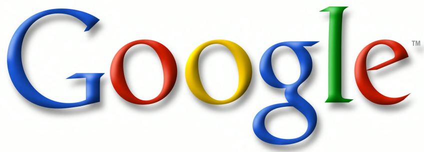
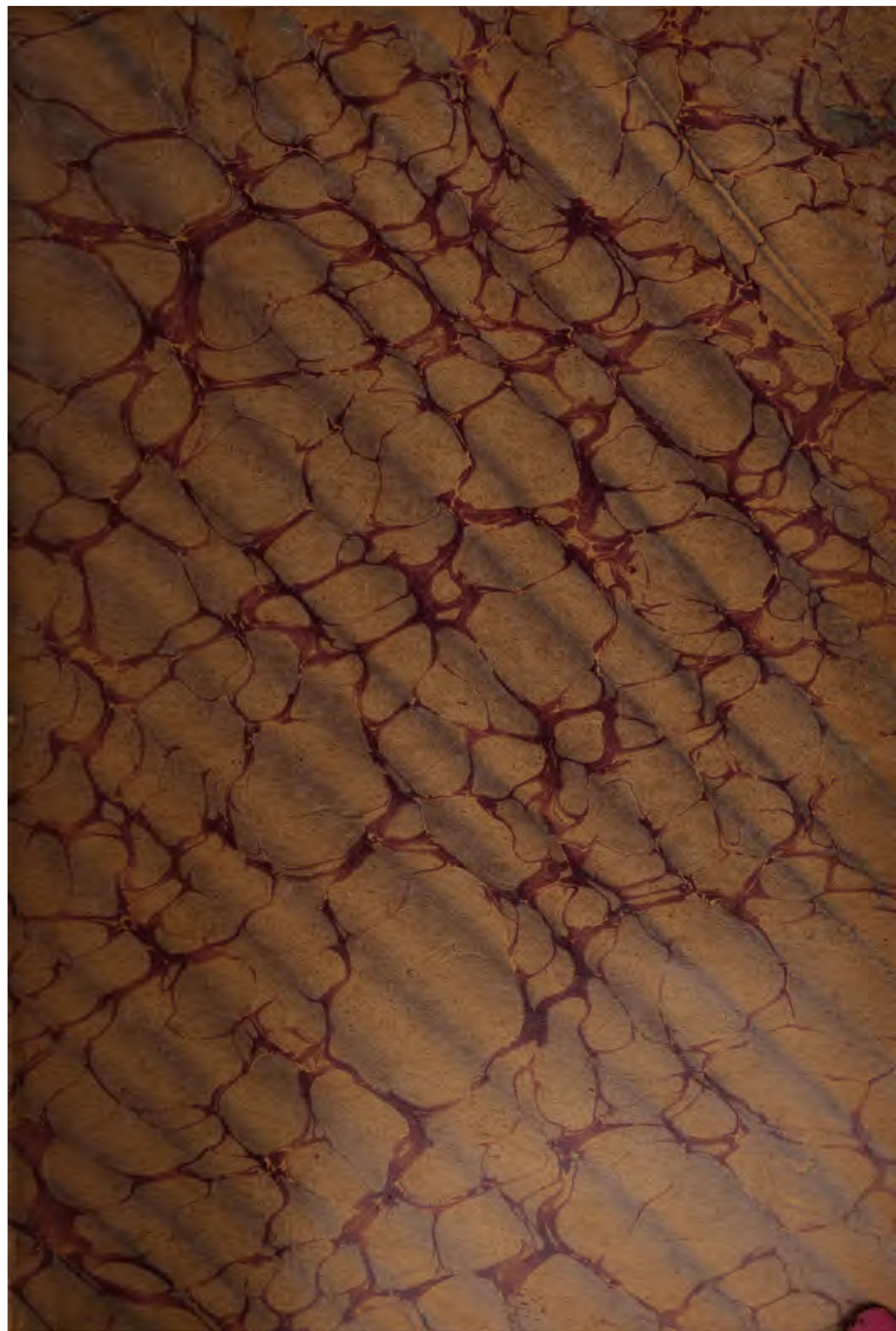




LES PORTS MODERNES

Courbevoie. — Imprimerie E. Bernard et Cie, 14, rue de la Station.
Bureaux : 29, quai des Grands-Augustins — Paris.

LES

PORTS MODERNES

PAR

C. de CORDEMOY

Ingénieur des Arts et Manufactures

PREMIER VOLUME



PARIS

E. BERNARD ET Cie, IMPRIMEURS-ÉDITEURS

29, Quai des Grands-Augustins, 29

—

1900

CONSTRUCTION DES PORTS

GÉNÉRALITES

Le commerce du monde effectue la majeure partie de ses transports par la navigation à un taux que la route de terre ne pourrait égaler, au moins pour les matières encombrantes. Aussi les procédés usités pour la construction des abris, la réparation des navires, pour opérer leur manutention, ont-ils une influence notable sur la valeur des marchandises. De nos jours, la concurrence a déterminé des progrès qui ont en même temps profité à l'humanité.

C'est dans les rades et ports que se concentre le commerce maritime. L'étude de leur établissement, de leurs aménagements est donc l'une des branches les plus importantes, en même temps que des plus difficiles, de l'art de l'Ingénieur.

Rades. — Les rades sont les portions de la mer, voisines des côtes, où les navires peuvent jeter l'ancre et procéder à leurs opérations.

Les rades *fermées* sont abritées contre les vagues par des caps, des îles, des récifs, ou sont constituées par des baies closes.

Les rades *foraines*, au contraire, sont complètement ouvertes. Les navires y mouillent en pleine mer et ne recherchent guère que les fonds de bonne tenue, c'est-à-dire où les ancres s'accrochent avec assez de solidité pour ne pas chasser. Parfois, les rades foraines sont relativement protégées par des bancs sous-marins ; sur ces hauts-fonds les vagues déferlent et s'amortissent en partie. A Dunkerque, il y a ainsi cinq bancs successifs séparés par des chenaux : les Ruytingen, les Dicks, le Ratel, le Breedt Bank et le Smal Bank. Même durant les mauvais temps, les lames y perdent assez de leur violence pour que la rade

conserve un calme relatif. A Nieuport, bien que le mouillage ne soit abrité que par deux rangées de bancs, il est également assez tranquille.

Ports. — Le travail accompli sur les rades, et qui nécessite le plus souvent l'intervention d'allèges, est coûteux, car le navire doit rompre charge. Cet inconvénient n'existe pas dans les ports, où les bâtiments trouvent un abri complet et des moyens commodes de manutention.

La nature parfois en a fait tous les frais. Ailleurs, la main de l'homme a amélioré les refuges naturels ou les a créés de toutes pièces.

Les ports naturels sont souvent le lit de fleuves navigables et les plus grands centres commerciaux se sont ainsi établis : Londres sur la Tamise, New-York sur l'Hudson, Liverpool sur la Mersey, Anvers sur l'Escaut, Calcutta sur l'Hoogly, Bordeaux sur la Garonne, Hambourg sur l'Elbe. La plupart de ces ports fluviaux ont dû d'ailleurs conquérir des bassins annexes sur les rivages adjacents.

D'autres ports naturels sont constitués par des baies fermées. Tels Rio-de-Janeiro au Brésil, Milford-Haven en Angleterre et la darse qui longtemps a suffi seule au commerce de Marseille et, sous le nom de Vieux Port, y reçoit encore tous les voiliers.

Mais les ports naturels complets sont rares. Même dans l'antiquité, il a fallu le plus souvent les améliorer, creuser, y ajouter des ouvrages. Presque partout on a établi des quais. Là où l'amplitude de la marée est considérable, le reflux laisse les navires à sec : pour éviter cet inconvénient, on construit des *bassins à flot*, dont le niveau est maintenu constant. Londres, Liverpool, Anvers, Le Havre possèdent un grand nombre de ces bassins.

La construction des ports artificiels est commandée soit par des considérations stratégiques (Cherbourg), soit par le manque absolu d'abri sur la côte (Madras, la Réunion), soit par les exigences du commerce local (Kingstown, Heyst).

Ces travaux, autrefois exceptionnels quand la dimension des navires leur permettait de s'abriter dans les criques les plus étroites et les moins profondes, prennent au contraire chaque jour de l'importance, en raison du tonnage des bâtiments actuels qu'accroîtra encore l'avenir. A Marseille on a édifié une série de darses en eau profonde et les anciennes sont déjà insuffisantes pour les nouveaux navires dont la longueur dépasse 200 mètres.

Aussi tous les ports se sont-ils récemment développés dans des pro-

portions jusqu'ici inconnues, et l'exemple le plus remarquable est celui de Hambourg. En 1865, il ne recevait que 5186 navires dont le tonnage s'élevait à 1200000 tonnes; le nombre des bâtiments restait presque stationnaire jusqu'en 1875 : 5260; mais le tonnage avait passé à 2000000 de tonnes, et il était de 2200000 tonnes en 1877.

A ce moment, Hambourg avait l'importance du Havre mais restait bien inférieur aux principaux ports anglais. Durant les années suivantes, l'industrie allemande prenait un essor imprévu et Hambourg, son principal centre d'exportation, suivait ce colossal mouvement d'ascension; en 1896, il recevait de la mer 10477 navires jaugeant 6450000 tonneaux. De l'Elbe supérieure descendaient en même temps des bateaux jaugeant 3600000 tonnes. C'est un mouvement total de 10000000 de tonnes. Quelques années ont suffi pour élever Hambourg au niveau de Londres et Liverpool, ces vieux marchés.

Anvers a eu, à un moindre degré, la même fortune. Voici la statistique du tonnage des navires de mer entrés dans son port durant les quarante dernières années.

1860 . . .	500000 tonnes	1884 . . .	4100000 tonnes
1867 . . .	1000000 —	1894 . . .	5100000 —
1873 . . .	2000000 —		
1880 . . .	3000000 —	1897 . . .	6315920 —

Les installations actuelles ne suffisent plus et 2000 mètres de nouveaux quais seront bientôt livrés au commerce.

Rotterdam, relié à la mer par une voie qui permet depuis peu l'accès des plus grands navires, aspire à détrôner Hambourg et Anvers. Son mouvement atteint 5680000 tonnes en 1898.

CHAPITRE PREMIER

ÉTUDES PRÉLIMINAIRES

Les conditions géographiques, géologiques, météorologiques de la localité où se projette un travail maritime sont de la plus haute importance. La direction de la côte, ses découpures, ses abris, la composition des terrains doivent donc être étudiés avec le plus grand soin, mais les méthodes générales employées n'ont pas besoin d'être indiquées ici. De même des observations météorologiques ; il est prudent de les avoir pour une année au moins avant de commencer les travaux. Nous nous bornons à donner des indications sommaires sur quelques points spéciaux.

Sondages. — Trois théodolites placés à terre sont nécessaires pour assurer l'exactitude de la position de l'embarcation où se tient le sondeur. Les observateurs suivent un drapeau fixé au haut d'une perche et qu'on abaisse au moment du sondage. Ce procédé vaut mieux que l'inverse, l'élévation du signal à l'instant où l'on jette le plomb. La distance entre deux points de sonde s'estime en général par un certain nombre de coups d'aviron. En mer, un petit vapeur est plus commode que l'embarcation à rames ; il doit absolument être ponté, car un grain subit peut le mettre en danger.

La position d'un point de sondage s'obtient avec une exactitude très grande. Il est aisé de se rendre compte que sur un cercle de 5 kilomètres de rayon une approximation de 10 secondes ne donne que 2,35 m d'erreur au maximum.

Nous avons aussi, pour fixer les points de sonde, eu recours à des mâts élevés en quinconces sur la plage. Les sondages se faisaient à l'intersection des alignements, qu'on avait étudiés d'avance pour obtenir des recoupements assez rapprochés. Il est nécessaire de munir les

mâts, pour les distinguer, de drapeaux de couleurs différentes. Ce procédé très précis a aussi l'avantage de permettre une vérification facile, au cas où l'on constaterait une irrégularité dans les résultats. Il ne peut s'employer qu'à distance restreinte, mais le plus souvent suffisante.

Pour les cartes hydrographiques, la position du sondage est prise par deux observateurs placés sur le bateau, au moyen de sextants qui donnent une approximation de 20 secondes.

Les angles sont relevés simultanément avec un point commun ; on fait de fréquentes vérifications et les positions sont immédiatement reportées sur la carte.

Il est bon de faire sonder sous le vent, où les mouvements de la mer sont moins prononcés.

Pour les profondeurs au-dessous de 4 mètres, l'embarcation étant arrêtée par les rames, on se sert d'une perche divisée en décimètres, et dont la division part de l'extrémité inférieure, munie d'une planchette horizontale afin d'empêcher la pénétration dans le fond.

Pour les profondeurs supérieures, on emploie le plomb de sonde ordinaire, dont la corde en chanvre est divisée en mètres par des nœuds en cuir ; le cuir est remplacé par de l'étamine rouge tous les 10 mètres et blanche tous les 5 mètres. Le diamètre de la corde est de 5 millimètres ; on la gradue après l'avoir mouillée tendue horizontalement sur des traverses, l'une des extrémités fixée et l'autre chargée du plomb. Malgré ces précautions, il est nécessaire de la mesurer de temps en temps et de tenir compte des différences constatées.

Au delà de 20 mètres, on a avantage à remplacer la corde par un fil d'acier enroulé sur un petit treuil en bois ; on éloigne le fil du bordage en le faisant passer sur une poulie écartée. Pour les grandes profondeurs, on a des appareils spéciaux, mais dont l'ingénieur maritime n'a guère à se servir (sondes de Brooks, etc.).

Pour rapporter des échantillons du fond, le plomb est creusé en dessous d'une petite cavité contenant du suif où se collent les matières. On emploie aussi un petit vase pyramidal en cuivre, dont les côtés de la base ouverte sont armés de couteaux d'acier capables d'entamer le sol ; le fond est percé d'un trou communiquant avec un sac maintenu ouvert par un ressort. Cette ouverture est munie d'une soupape à boulet qui s'ouvre quand l'appareil est traîné sur le côté, mais se ferme quand on le relève.

L'heure des sondages est notée, car il faut réduire les lectures selon la marée. Le zéro est en France au niveau des plus basses mers observées, en Angleterre à celui du niveau moyen des basses mers de vive eau. La carte du littoral de la Belgique levée en 1866 et 1882 par MM. Stessels et Petit a comme zéro la moyenne des basses mers de vive eau ordinaire, plus élevée de 70 *cm* environ que le repère français. Le repère de comparaison hollandais est l'*Amsterdamsche Peil* (A P.), qui se trouve à 149 *cm* au-dessus du niveau moyen de la mer à Amsterdam ; en Allemagne, c'était le *Normal-Null*, situé à peu près à 6 centimètres au-dessus du niveau moyen de la Baltique à Swinemunde, mais on a maintenant adopté l'*Amsterdamsche Peil*. En vue des besoins de la pratique, il vaut mieux prendre pour zéro le niveau minimum, qui n'exige pas la connaissance de l'amplitude de la marée pour en déduire la profondeur à la plus basse mer. Sur une côte non encore étudiée, on choisit un zéro provisoire que l'on modifie ensuite par des observations plus complètes.

Si l'on n'a pas de marégraphe enregistreur, il faut faire observer la marée sur une règle graduée, au moins d'heure en heure. On peut, avec l'heure et les niveaux de la marée haute et de la marée basse, opérer la réduction approximative d'après la formule de Laplace

$$y = A \cos 2\pi \frac{t}{T}$$

(A, demi-amplitude de la marée du jour ; T, durée de cette marée ; t, temps compté depuis la pleine mer précédente ; y, dénivellation positive ou négative par rapport au niveau moyen).

En supposant la marée de 6 heures on a, en appelant 1 l'amplitude, les coefficients suivants, pour chacune des heures après la haute mer :

1h	2h	3h	4h	5h	6h
0,86 —	0,50 —	0 —	0,50 —	0,86 —	1

Dans les fleuves, il faudrait compter à part le flot et le jusant dont les durées sont différentes.

Les cotes de sonde étant relevées et inscrites sur le plan, les courbes de niveau indiquent la forme du fond de la mer.

Lunette d'eau. — Cet instrument trop négligé sert à étudier la nature du lit de la mer. C'est un tube en zinc de 2 mètres de lon-

gueur et de 5 centimètres de diamètre, dont une extrémité est fermée par une vitre. On enfonce cette extrémité de quelques centimètres dans l'eau et l'on regarde par l'autre ; la vue n'est pas gênée par les rides de la surface et peut pénétrer à dix mètres.

Courants. — On obtient une première approximation de la vitesse et de la direction des courants par un flotteur qu'on suit avec des théodolites ; mais l'influence du vent entraîne à des erreurs. On emploie aussi le moulinet de Woltmann, sur une embarcation solidement ancrée par deux grappins ; cet instrument ne donne pas les vitesses au-dessous de 20 *cm* par seconde. Le tachomètre de Brunings est encore l'instrument le plus exact.

Le double flotteur de Mitchell est à l'abri de l'action du vent. Il se compose de deux vases réunis par un cordage ; l'inférieur, ouvert, se remplit d'eau ; le supérieur, fermé, est lesté de façon à soutenir l'ensemble en ne laissant émerger que le bouchon, où l'on plante un petit drapeau. La longueur du cordage peut varier pour permettre l'étude des courants à diverses profondeurs. On laisse le flotteur filer, d'une embarcation affourchée, au bout d'une ficelle divisée en mètres ; la direction

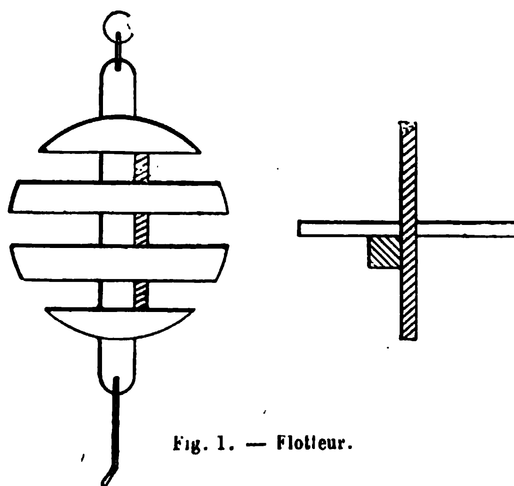


Fig. 1. — Flotteur.

est relevée à la boussole. On peut remplacer même avec avantage les vases par des bouteilles.

La trajectoire du flotteur double est la résultante des courants du fond et de la surface ; on détermine d'abord les éléments de celui-ci, et l'on en déduit ceux du courant inférieur. La corde du double flotteur est la

cause d'erreurs qui font exagérer la valeur de la vitesse moyenne ; de plus le flotteur de fond dans les courants rapides ne reste pas à la profondeur indiquée par la longueur du cordeau ; il faut donc réserver ce procédé pour les vitesses modérées.

Un autre flotteur pour étudier les courants inférieurs consiste en planchettes clouées à angle droit sur une courte pièce de bois de section carrée (fig. 1). Les planchettes figurent un cercle ; un lestage inférieur donne à l'ensemble la densité du liquide. On plonge l'appareil suspendu à une cordelette.

Rivières et estuaires. — Dans les rivières étroites, les sondages s'effectuent le long de cordes tendues en travers et divisées en mètres. On a employé en Allemagne l'appareil représenté par la figure 2 pour déterminer le thalweg d'un cours d'eau.

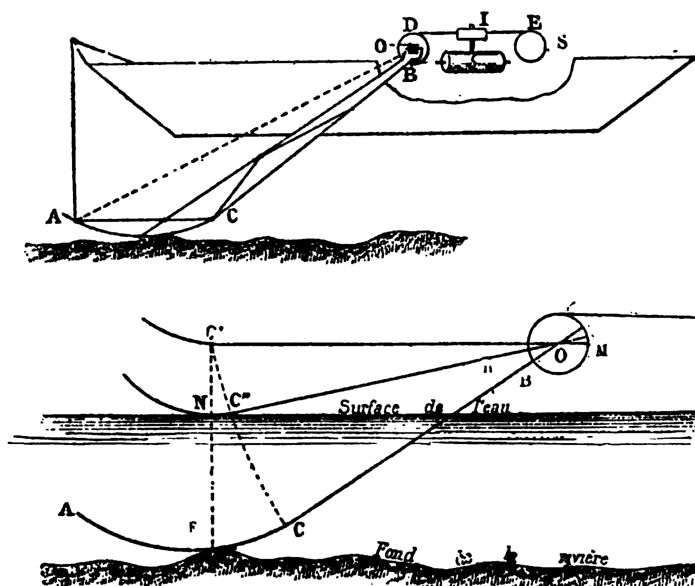


Fig. 2. — Appareil automatique de sondage.

Il se compose d'une poutre armée ACB, dont une portion OC = R est droite ; elle est terminée par une courbe AC qui peut glisser sur le fond de la rivière ; la poutre est reliée à un arbre horizontal O de rayon r que font tourner les mouvements de la courbe. Sur cet arbre est fixée une lame flexible DE tendue par le tambour à ressort S et qui porte un crayon I, destiné à enregistrer les variations angulaires de l'arbre O sur une bande de papier qui se déroule sous lui.

Un deuxième crayon fixe trace sur le papier la ligne de surface d'eau. On peut y faire marquer également les longueurs kilométriques par un troisième crayon.

La courbe AC étant une développante du cercle dont O est le centre et R le rayon, on a :

$$C'F = \text{arc } C'C \qquad C'N = \text{arc } C'C''$$

C'F — C'N ou la profondeur cherchée = arc CC"

$$\text{Arc } CC'' = BH \frac{OC}{OM} = BH \frac{R}{r}$$

et il est indiqué par la courbe que trace le crayon 1.

Soient y les ordonnées de cette courbe, P la profondeur, on a donc

$$P = \frac{R}{r} y$$

Le papier se déroulant d'une façon uniforme, les observations de longueur doivent être fréquentes ; on pourrait faire dépendre ce mouvement de la vitesse du bateau, ce qui rendrait l'appareil automatique.

Haut fond. — Pour constater la présence d'un haut fond accidentel en mer ou en rivière, on peut faire traîner derrière un bateau une barre de fer qu'on soulève s'il se présente un obstacle. Au canal de Suez, avant l'ouverture, on a passé d'un bout à l'autre un châssis ayant les dimensions minima de la section droite.

Epaisseur du sable. — L'épaisseur d'une couche de sable sur un fond solide se reconnait par un appareil composé de deux tubes verticaux de 30 et 70 millimètres de diamètre, le premier pouvant s'enfoncer dans l'autre. Ils se décomposent en bouts de 4 mètres, assemblés par des manchons filetés. Le tube extérieur est lesté supérieurement de 80 kilogrammes et dépasse par en bas de 15 centimètres l'intérieur, où une pompe injecte de l'eau comprimée qui désagrège le sable ; le mélange remonte par l'espace annulaire et l'appareil s'enterre à mesure. On a pu ainsi traverser des couches de sable de 18 mètres.

CHAPITRE II

VENTS

Les vents engendrent les vagues ; leur observation indique souvent le temps probable et permet de prévoir les chances d'un travail à entreprendre ; ils influent sur la manœuvre des navires à l'entrée et à la sortie des ports ; enfin, la pression qu'ils exercent sur les ouvrages comme les phares et les ponts entre dans les calculs de résistance. Leur étude est donc indispensable.

Le vent est déterminé par la différence de température entre deux points du globe. L'air échauffé s'élève dans les régions supérieures de l'atmosphère et crée près du sol un vide relatif vers lequel se précipitent les couches voisines : c'est ce déplacement qui constitue le vent. Les masses de gaz de la colonne ascendante, arrivées à une certaine hauteur, se déversent latéralement, de sorte qu'à tout courant inférieur correspond un contre-courant supérieur.

Classification des vents. — On peut classer les vents en *permanents*, *périodiques* et *variables*.

L'échauffement de l'anneau gazeux qui entoure le globe à l'équateur détermine un appel de l'air des pôles. Si la terre était immobile, le vent résultant suivrait les méridiens ; mais, à mesure que le courant s'approche de l'équateur, il rencontre des cercles dont le diamètre augmente, ainsi que la vitesse périphérique. L'inertie des molécules ne leur permet pas de prendre instantanément cette vitesse ; elles éprouvent un retard continu, et semblent souffler du nord-est dans l'hémisphère boréal, du sud-est dans l'hémisphère austral.

C'est là l'origine des *vents alizés*, que les Anglais appellent *trade-winds* (vents du commerce), à cause de leur influence sur la marche des navires à voiles. Ils sont constants, mais leurs limites varient avec les

saisons, par suite du déplacement apparent du soleil par rapport à l'équateur.

Les vents périodiques sont les *moussons* des mers de l'Inde, de la Chine et de l'Australie. L'océan s'échauffe moins que les continents en été et se refroidit moins en hiver, d'où résulte un appel d'air, en deux directions opposées pendant six mois, entre le vaste continent asiatique et les mers qui l'environnent.

Les courants aériens variables se produisent en dehors de l'action des vents permanents ou périodiques et, suivant les circonstances, soufflent des divers points de l'horizon. Dans une localité il en est de plus fréquents, qu'on appelle *vents régnants*. L'expression *vents dominants* est réservée aux plus violents ; comme les tempêtes ne soufflent pas toujours dans la même direction, car les dépressions atmosphériques ou *cyclones* passent tantôt d'un côté tantôt de l'autre du lieu considéré, c'est donc la résultante générale qu'il faut considérer.

Les cyclones sont de vastes tourbillons qui se forment près de l'équateur et se dirigent vers les pôles suivant une trajectoire parabolique. En dehors de leur mouvement de translation, ils sont soumis à une rotation autour d'un centre où règne un calme complet, et où la hauteur barométrique est très réduite.

Dans la mer des Indes, ces météores dirigent leur première branche du nord-est vers le sud-ouest, en ne se déplaçant guère que d'une vingtaine de milles à l'heure, mais leur vitesse de rotation est considérable. Le diamètre de ces vastes trombes atteint plusieurs centaines de milles et les désastres qu'elles occasionnent sont immenses.

En Europe les cyclones, beaucoup moins dangereux, viennent de l'Atlantique ou même de l'Amérique du Nord, qui en annonce souvent l'arrivée sur nos côtes.

Dans l'hémisphère austral, la rotation des vents s'effectue dans le sens de la marche des aiguilles d'une montre ; dans l'hémisphère boréal en sens inverse. En faisant face au vent, on a le centre du cyclone à sa gauche.

Direction des vents. — L'ingénieur maritime a surtout intérêt à connaître les vents régnants et les vents dominants ; leur étude exige plusieurs années d'observations. Il faut les exécuter aux heures convenables, ce qu'apprend vite l'expérience. Les vents régnants, d'ordinaire, ne soufflent que le jour et leur violence maximum se fait

sentir à certains moments, qu'on doit choisir pour leur observation.

On appelle sur nos côtes de la Manche et de l'Océan vents d'aval ceux qui soufflent du nord au sud en passant par l'ouest, et vents d'amont ceux qui soufflent du nord au sud en passant par l'est. Les vents d'amont comprennent le premier et le second quadrants, ceux d'aval les troisième et quatrième.

C'est la girouette qui indique les directions, qu'on relève généralement à la vue ; mais il existe aussi des girouettes à enregistrement automatique.

Les directions sont rapportées, dans le sens du souffle, aux points cardinaux vrais ; la *Rose des vents* représente le cercle divisé en 8, 16 ou 32 parties, suivant le degré d'exactitude qu'on veut obtenir. On condense les résultats dans des tableaux tels que le suivant :

Régime des vents a Dieppe

(*déduction faite de 8 jours de calme.*)

N	NE	E	SE	S	SO	O	NO
17	34	36	39	61	64	63	45

Parfois, on représente le résumé des observations par des graphiques analogues à ceux de la figure 3 en portant sur les diverses directions

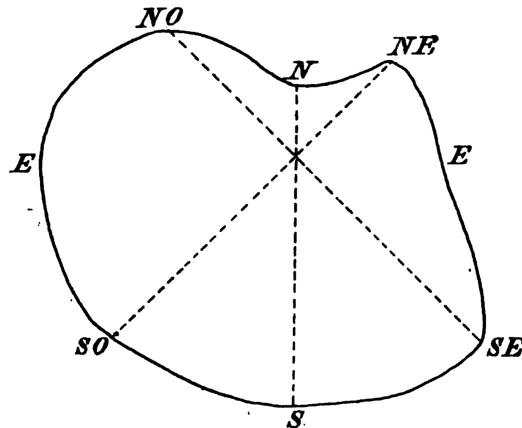


Fig. 3 — Diagramme des vents à Dieppe.

des longueurs proportionnelles au nombre des jours où chaque vent a été observé et en joignant ou non ces points par une courbe. La figure

donnée est la traduction du tableau précédent : les vents y sont dessinés convergeant vers le centre.

Formule de Lambert. — On doit au mathématicien Lambert une formule qui donne le résultat des observations. En appelant φ l'angle que fait cette résultante avec le nord vers l'est,

$$\mathrm{tg} = \frac{E - O + (NE + SE - SO - NO) \cos 45^\circ}{N - S + (NE + NO - SE - SO) \cos 45^\circ}$$

L'origine de cette formule s'explique par la figure 4 ; car $\mathrm{tg}\ \varphi = \frac{RM}{CM}$ et RM et CM sont les résultantes de la projection sur les lignes EO et NS des longueurs qui représentent le nombre des jours où a soufflé chaque vent ; ceux-ci sont figurés soufflant de l'origine.

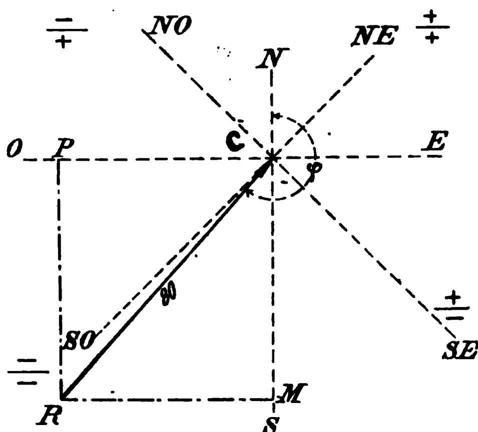


Fig. 4. — Formule de Lambert.

Le schéma indique aussi le quadrant où se trouve la résultante CR suivant les signes des termes de la fraction qui donne tg φ. Ainsi, pour Dieppe, on a d'après les chiffres précédents.

$$\mathrm{tg}\ \varphi = \frac{36 - 63 + (34 + 39 - 64 - 45)\sqrt{\frac{1}{2}}}{17 - 61 + (34 + 45 - 39 - 64)\sqrt{\frac{1}{2}}} = \frac{-51}{-62}$$

La résultante est donc dans le troisième quadrant ; on trouve $\varphi = 220^\circ\ 26'$, soit un vent du sud-ouest à peu près.

La formule de Lambert donne en outre la valeur de cette résultante, ce que l'auteur appelle la quantité de force. La figure 4 montre en effet que $\overline{CR}^2 = \overline{RM}^2 + \overline{CM}^2$, c'est-à-dire que la résultante est « l'hypo-

thénuse d'un triangle rectangle dont les deux *cathètes* sont le numérateur et le dénominateur de la fraction ».

Pour Dieppe,

$$R = \sqrt{51^2 + 61^2} = 80$$

La résultante est un vent du sud-ouest qui soufflerait pendant 80 jours.

Procédé graphique. — On obtient plus simplement la résultante en direction et grandeur par la construction du polygone des vecteurs obtenus en considérant le nombre des jours où a soufflé chaque vent comme une force, et en donnant à chacune sa direction réelle à une échelle déterminée.

La figure 5 représente le graphique pour Dieppe, à l'échelle de un demi-millimètre pour un jour.

Si l'on voulait composer 16 ou 32 aires de vents, la formule de Lambert ne s'appliquerait plus et devrait être remplacée par une autre plus compliquée, tandis que le procédé graphique conserve sa simplicité.

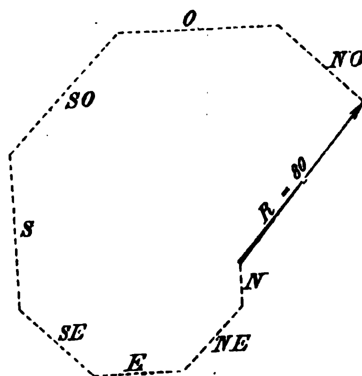


Fig. 5. — Résultante des vents à Dieppe.

Appareil Besson. — Récemment M. L. Besson a construit un ingénieux appareil pour obtenir mécaniquement la résultante des vents en grandeur et direction.

C'est une roue mobile autour d'un axe horizontal, munie à son pourtour de 8 ou 16 chevilles également espacées et figurant la rose.

A chacune on suspend un poids correspondant au nombre d'observations du vent correspondant, et le rayon vertical qui se dirige vers le bas de la roue donne la direction de la résultante. Pour obtenir la grandeur, on suspend des poids à une alidade fixée sur le rayon opposé à la résultante, jusqu'à obtenir l'équilibre.

Résultats. — Rien n'est plus saisissant que la vue des flèches indiquant la direction des résultantes des vents le long d'une côte. La figure 6 les réunit pour nos rivages de l'Océan. En figurant celles déduites des observations faites au Havre, au marégraphe du port et sur la colline d'Ingouville, on trouve une différence qui montre que l'un au

moins des deux observatoires donne des indications erronées ; c'est sans doute celui du marégraphe, masqué par les maisons voisines.

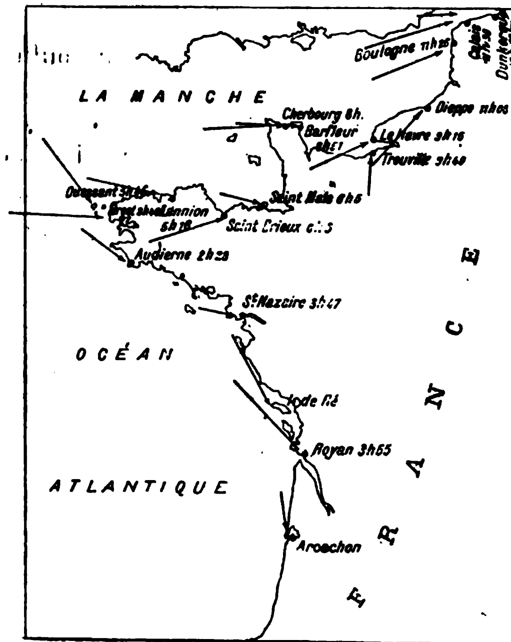


Fig. 6. — Résultante des vents sur les côtes de France.

De même les résultantes des observatoires d'Ajaccio et de l'île Sanguinaire sont diverses ; c'est sur les vents de cette dernière station que les navires se fient, les directions étant ensuite modifiées par les rivages de la baie. Ces exemples prouvent l'importance du choix de la situation de la girouette.

Vitesse du vent. — La direction n'est que l'un des facteurs de l'action du vent ; l'autre est son intensité, qui dépend de sa vitesse. On l'obtient par l'anémomètre de Robinson, qui se compose en principe de quatre hémisphères creux, fixés à l'extrémité de deux bras horizontaux réunis en croix à un axe vertical mobile. Le vent agissant sur les coupes communique à l'axe un mouvement qui est transmis à un cadran indicateur ou à un appareil enregistreur.

Pour que les données de l'instrument soient comparables, il doit être d'un modèle uniforme. Celui du *Meteorological Office* d'Angleterre a des bras de 61 *cm* de longueur et des hémisphères de 23 *cm*

de diamètre ; les indications, affectées du facteur 2,2, donnent la vitesse réelle du vent.

Échelle de Beaufort. — Le commandant anglais Beaufort a donné en 1806 une échelle de la vitesse du vent, divisée en 12 numéros suivant la voilure que peut supporter un navire. M. Curtis a publié récemment une étude complète de cette échelle et a déduit de ses comparaisons les résultats suivants :

Force	Désignation des vents	Vitesse en milles par heure		Vitesse en mètres par seconde (Curtis)
		Curtis	Harding	
0	Calme	2	2	0,9
1	Léger souffle	4	3	1,8
2	Légère brise	7	5	3,1
3	Jolie brise	10	8	4,5
4	Brise modérée.	14	12	6,3
5	Fraîche brise	19	17	8,5
6	Forte brise.	23	23	11,2
7	Grand frais	31	30	13,9
8	Petit coup de vent . . .	37	38	16,5
9	Coup de vent	44	47	19,7
10	Fort coup de vent. . . .	53	57	23,7
11	Tempête	64	66	28,4
12	Ouragan	77	80	34,4

M. Harding a proposé, pour représenter la vitesse V en milles par heure, la formule $N + 2 = V$ dans laquelle N est la somme des premiers nombres jusqu'au numéro considéré ; on voit dans la colonne spéciale du tableau ci-dessus que les résultats sont en effet assez approchés de ceux de M. Curtis.

Représentation graphique. — Dans le polygone qui figure la fréquence relative des vents on peut, bien entendu, tenir compte des intensités relatives, en prenant pour vecteurs les produits des vitesses par le nombre d'heures qu'a duré le vent considéré. Comme la pression du vent est proportionnelle au carré de sa vitesse, il est encore plus exact de remplacer dans les produits précédents les vitesses par leurs carrés.

Lentz a donné comme moyenne de 24 années d'observations à Cuxhaven le tableau suivant :

Directions	Nombre de jours des vents ayant une vitesse moyenne de					Nombre total de jours
	2,45m	6,10m	9,75m	13,70m	16,45m	
NNO et N.	24	11	5,50	0,42	0,08	41
NNE et NE	15	8	3,50	0,50	—	27
ENE et E. .	26	14	7,10	0,82	0,08	48
ESE et SE. .	19	8	2,90	0,10	—	30
SSE et S . .	28	9	1,93	0,07	—	39
SSO et SO .	40	21	7,40	0,50	0,10	69
OSO et O. .	30	21	10,00	0,90	0,10	62
ONO et NO .	20	17	10,40	1,38	0,22	49
Total. . .	202	109	48,73	4,69	0,58	365

Le polygone des vecteurs construit avec le nombre des jours où a soufflé chaque vent donne comme résultante un vent du S.-O. soufflant pendant 57 jours. Mais si l'on remplace ces nombres par les produits des carrés des vitesses moyennes par le nombre des jours des vents correspondants, on aboutit à un vent de l'Ouest, ce qui donnerait le tableau suivant en réduisant proportionnellement les produits obtenus de manière à atteindre le total de 365.

NNO et N		NNE et NE		ENE et E		ESE et SE		SSE et S		SSO et SO		OSO et O		ONO et NO	
Nombre précédent	Nombre nouveau	N. p	N. n	N. p	N. n.	N. p	N. n	N. p	N. n	N. p.	N. n.	N. p.	N. n.	N. p.	N. n.
41	40	27	27	48	50	30	24	39	24	69	61	62	70	49	69

La différence n'est guère sensible. Pour Cuxhaven, le résultat indique donc que l'action des vents dominants serait à peu près la même que celle des vents régnants. Mais il n'en est pas de même partout et il est très important de connaître et de comparer ces actions différentes.

Ainsi, pour Dunkerque, M. Eyriaud des Vergnes donne un relevé des directions des vents et de leur durée, dont nous avons tiré le tableau suivant qui indique, en proportion pour cent :

En première ligne, la durée des vents dans chaque direction.

En deuxième ligne, le produit de la durée par la vitesse moyenne relative, ce que M. E. des Vergnes appelle le coefficient d'agitation.

En troisième ligne, le produit de la durée par le carré de la vitesse moyenne relative :

N	NE	E	SE	S	SO	O	NO
5,6 6,3 6,8	13 14,1 16,3	12,8 12,8 12,3	9,8 5,6 3,2	8,8 6,2 4,3	19 17,3 15,4	18,6 23,2 26,1	12,4 14,5 15,6

Les résultantes générales obtenues par le procédé graphique sont :

1er *cas*. — Un vent faisant avec l'est un angle de 35° vers le *Nord* et soufflant 48 jours, c'est-à-dire presque SO.

2e *cas*. — Un vent faisant avec l'est un angle de 10° vers le *Sud*, c'est-à-dire presque Ouest.

3e *cas*. — Un vent faisant avec l'est un angle de 45° vers le *Sud*, c'est-à-dire NO.

On voit que la résultante, en ne tenant compte que du temps où a soufflé chaque vent, est presque un vent du S.-O., tandis qu'en multipliant ce temps par le carré de la vitesse on obtient un vent du N.-O. soufflant pendant une durée double. L'action sur les vagues est donc toute différente.

Lorsqu'on ne considère la résultante générale qu'au point de vue de la marche des matériaux sur le rivage par l'effet des vagues, il y a lieu de tenir compte de considérations spéciales. Les vents de terre ne produisant pas de vagues doivent être écartés, de même ceux qui battent la côte normalement.

A Dunkerque, les vents du sud, sud-est et sud-ouest viennent de terre ; celui du nord est normal à la plage ; il ne reste en présence que les vents des autres aires. Or, ceux de N.-E. et N.-O. se compensent presque ; les facteurs du mouvement viennent donc de l'est et de l'ouest. La différence de leurs actions, dans les trois cas considérés au tableau précédent est 5,8 — 10,4 et 13,7 qui correspondent à des vents d'ouest soufflant pendant 21 — 38 et 50 jours.

Parfois, les alluvions marchent en sens inverse de celui indiqué par la résultante générale des vents *observés sans leur intensité*. Ainsi, devant Saint-Augustin (Floride), les vents régnants sont du sud-est, mais les plus violents viennent du nord ; et seuls ceux-ci, ainsi que l'observation le démontre, font marcher les sables vers le sud-ouest.

Il est donc indispensable de faire les observations en tenant compte des vitesses. Tout au moins, dans la comparaison des vents, faut-il tenir compte de la résultante générale et non du simple aspect

des diagrammes tels qu'on les donne d'ordinaire et qui conduisent à des inductions erronées. Mais on n'aurait encore ainsi qu'une apparence d'exactitude. Le seul procédé scientifique et utile à la pratique est celui que nous indiquons et l'on s'en rendra compte en songeant qu'un seul jour de tempête bouleversera beaucoup plus une plage qu'un mois de vents faibles.

On ne saurait trop appeler l'attention des observateurs sur l'importance des faits précédents.

Pression du vent. — Des instruments spéciaux (anémomètres de Castor, d'Osler, etc.) ont été construits pour mesurer la pression du vent sur une surface. L'anémomètre d'Osler consiste, en principe, en une plaque de tôle placée perpendiculairement au vent et qui s'appuie sur un ressort dont les indications sont transmises à un cadran. La flexion du ressort, préalablement mesurée par l'application de poids, indique la pression exercée.

Mais en général on déduit cette pression de la vitesse du courant aérien. Smeaton a donné, pour les vents ne dépassant pas 25 mètres par seconde, la formule $P = 0,005\ v^2$ dans laquelle P est la pression en livres par pied carré et v la vitesse en milles par heure. Une Commission anglaise, chargée de l'étude de cette question en 1881, a doublé la pression et donne la formule

$$P = 0,01\ v^2$$

Cette formule, pour P en kilogrammes par mètre carré et v en mètres par seconde, devient

$$P = 0,243\ v^2$$

Un vent de 25 milles à l'heure ou de 11,18 *m* par seconde, donne P = 30 kilogrammes par mètre carré.

La Commission anglaise rapporte qu'on a constaté à l'observatoire de Bidston, près de Liverpool, situé à 80 mètres au-dessus du niveau de la mer dans une situation fort exposée, une pression de 70 livres par pied carré ou 340 kilogrammes par mètre carré, qui correspond à une vitesse de 38 mètres à la seconde. Mais elle regarde ce chiffre comme exceptionnel et estime qu'on peut considérer comme maximum ordinaire 275 kilogrammes par mètre carré ou 56 livres par pied carré.

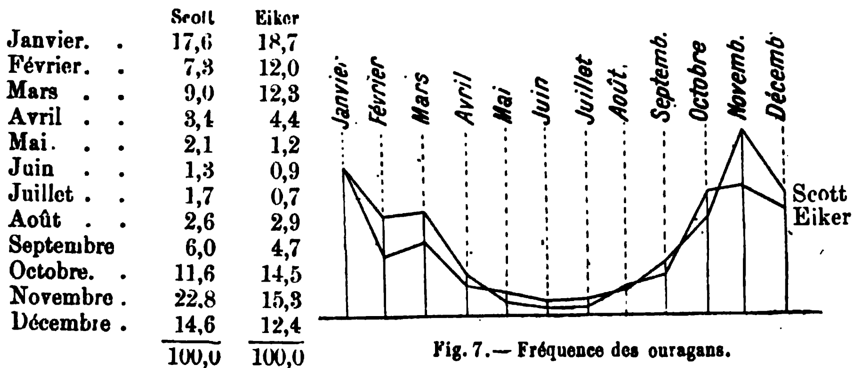
Dans une tempête qui a saccagé Charleston en 1893, l'ingénieur du

port a observé une vitesse de plus de 120 milles à l'heure, pendant une courte durée. C'est donc 54 mètres à la seconde, ce qui donnerait une pression de 700 kilogrammes par mètre carré.

C'est à la pression de 56 livres par pied carré que doivent obligatoirement résister les ouvrages d'art en Angleterre. Dans un discours prononcé à la British Association en 1898 par M. Wolfe Barry, cet ingénieur distingué déclare que de telles pressions ne peuvent être observées que sur des surfaces restreintes et que la moitié, soit 140 kilogrammes par mètre carré, constitue la pression qu'on devrait imposer dans les calculs de résistance.

Ces chiffres sont surtout intéressants pour le calcul des accessoires d'un port; la constance dans la direction de l'entrée a au contraire une influence directe sur l'orientation, principalement pour les ports fréquentés par les voiliers.

Fréquence des tempêtes. — M. Scott a donné pour les îles Britanniques et Eiker pour les côtes allemandes de la Mer du Nord, les nombres suivants relatifs à la fréquence des tempêtes suivant les mois.



	Scott	Eiker
Janvier. .	17,6	18,7
Février. .	7,3	12,0
Mars . .	9,0	12,3
Avril . .	3,4	4,4
Mai. . .	2,1	1,2
Juin . .	1,3	0,9
Juillet . .	1,7	0,7
Août . .	2,6	2,9
Septembre	6,0	4,7
Octobre. .	11,6	14,5
Novembre .	22,8	15,3
Décembre .	14,6	12,4
	100,0	100,0

Fig. 7. — Fréquence des ouragans.

Nous résumons en deux courbes (fig. 7) ces tableaux qui indiquent les mois les plus à redouter dans l'exécution des travaux. Il y a, d'après M. Scott, de 25 à 30 tempêtes annuelles.

Influence des vents sur les eaux de la mer. — En dehors de l'influence sur les marées dont il sera question plus loin, le vent, surtout dans les mers sans marées, accumule les eaux de la mer sur la côte vers laquelle il souffle. On a ainsi constaté des dénivellations de plus de 4 mètres dans la Baltique et de 1,50 *m* dans la Méditerranée.

CHAPITRE III

ONDES LIQUIDES

Le résultat de l'action d'une force sur une masse liquide est la formation d'une onde, c'est-à-dire d'un bourrelet qui se propage sur la surface.

Dans cette progression, les molécules ne sont pas l'objet d'un transport comme dans un courant; on voit en effet les corps légers qui flottent sur le liquide se soulever au passage de l'onde, puis retomber, mais sans être déplacés. C'est la forme de l'onde qui se transmet par une communication d'énergie; il faut y voir une apparence comme les ondulations qui se manifestent à la surface d'un champ de blé agité par le vent.

J. Scott Russell de ses expériences a conclu à l'existence de quatre ordres différents d'ondes, dont deux principaux. Parmi celles du premier ordre qu'il appelait, par une fausse conception du mécanisme de leur production, *ondes de translation*, il rangeait les lames de fond et les grandes houles (*rollers*) du Cap de Bonne-Espérance et de l'Atlantique; il en faisait aussi le type de l'onde-marée. Aux vagues ordinaires ou de deuxième ordre, il donnait le nom d'*ondes d'oscillation*.

Plus tard, J. Scott Russell introduisit dans sa classification des confusions et des erreurs sur lesquelles il est inutile d'insister.

Ondes de translation et d'oscillation. — Aujourd'hui, en France tout au moins, on réserve le nom d'*ondes de translation* à une onde dite aussi solitaire, parce qu'il ne s'en produit qu'une à chaque action de la force déterminante. Elle se trouve en entier au-dessus (onde positive) ou au-dessous (onde négative) de la surface, se propage longtemps sans altération de forme, et son mouvement se fait sentir jusqu'au fond du milieu où elle se développe.

On produit artificiellement l'onde positive par la compression latérale d'un liquide, ou par l'adjonction rapide d'un excédent d'eau. L'onde négative est au contraire le résultat d'une dépression subite, déterminée par exemple en retirant de l'eau un corps immergé.

Les *ondes d'oscillation* se manifestent sous l'action de forces comme la chute d'une pierre ou le souffle du vent. Elles se succèdent nombreuses; leur bourrelet se trouve moitié en dessus moitié en dessous de la surface; deux d'entre elles sont donc séparées par une dépression. Leur forme s'altère rapidement et leur action ne se fait sentir que sur une partie de la profondeur du liquide.

La distinction entre ces deux ordres d'ondes est d'ailleurs un peu factice; c'est ainsi que l'onde-marée est classée tantôt parmi les solitaires, tantôt parmi celles d'oscillation périodique. Elle se comporte, en général, comme les ondes du premier ordre, mais sa hauteur est moitié en dessus moitié en dessous de la surface.

Ondes de translation. — La propagation des ondes de translation a été surtout étudiée par J. Scott Russell et par M. Bazin. Voici le résumé des faits constatés ;

a. L'onde s'étend sur toute la largeur du lit dans lequel elle se propage;

b. Des ondes de même volume peuvent avoir des dimensions très variables en hauteur et en longueur ;

c. La vitesse v de l'onde dans une eau stagnante est représentée par la formule

$$v = \sqrt{g\,(H + h)} \tag{1}$$

H profondeur de l'eau, h hauteur de l'onde.

Si h est très petit par rapport à H, il peut être négligé et l'on retombe sur la formule déjà donnée par Lagrange

$$v = \sqrt{g\,H}.$$

qui ne tient compte que de la profondeur du liquide.

La formule de Lagrange peut s'écrire $v = \sqrt{2g\frac{h}{2}}$, et signifie que la vitesse est due à la demi-hauteur. D'après Scott Russell, cette formule ne s'applique qu'à un canal de section rectangulaire; en général, la

vitesse est due à la hauteur du centre de gravité de la section plane du canal au-dessous de la surface. Pour un triangle on a

$$v = \sqrt{2g\frac{h}{3}}$$

et pour une section parabolique

$$v = \sqrt{2gh\frac{2}{5}} \quad \text{ou} \quad 2\sqrt{\frac{gh}{5}}$$

d. La vitesse de l'onde dans une eau courante est

(2) $$v = \sqrt{g(H+h)} \pm U$$

U, la vitesse propre de l'eau courante, figure avec le signe $\pm$ suivant que l'onde descend ou remonte le courant.

Dans le dernier cas, pour que l'onde continue sa marche ascendante, il faut

$$\sqrt{g(H+h)} > U$$

Lorsque les deux termes de cette inégalité se rapprochent, la formule donne pour V des valeurs trop fortes ;

e. Par des actions répétées, par exemple en versant de l'eau à plusieurs reprises à la surface d'un canal, on produit des ondes successives de translation. Si elles sont de hauteurs inégales, il résulte de la formule (1) qu'elles ont des vitesses différentes ; la plus rapide rejoindra les précédentes et peut se confondre avec elles en une seule onde de dimensions plus grandes ;

f. Après s'être réunies, elles peuvent se séparer, la plus rapide devançant les autres ;

g. Une onde qui se propage dans une eau de profondeur variable varie aussi de forme. Quand la profondeur est grande, la forme est allongée, à courbure régulière et lisse ; à mesure que la profondeur diminue, l'onde se raccourcit et devient plus aigue en s'exhaussant peu à peu ; la crête s'incline en avant et enfin, lorsqu'elle ne rencontre plus qu'une profondeur insuffisante, elle se brise et disparait dans un tourbillon d'écume ;

h. L'onde ne se propage que dans une profondeur d'eau supérieure à sa hauteur. Avant même que les deux quantités ne soient égales, il y a déferlement ;

i. Il y a aussi déferlement quand le rapport de la hauteur de l'onde à la largeur de la base est trop grand ;

j. La propagation de l'onde entraîne un léger déplacement horizontal du liquide.

Soient : V la vitesse de propagation de l'onde,
v la vitesse du déplacement horizontal des molécules,
H la profondeur de l'eau,
h la hauteur de l'onde.

On a, d'après M. Comoy

$$\frac{v}{V} = \frac{h}{2H + h}$$

h étant en général très petit par rapport à H, la vitesse réelle des molécules est très faible relativement à celle de propagation.

Pour $h = H$, v devient $\frac{V}{3}$. A ce moment, où V a déjà d'ailleurs beaucoup diminué par suite du frottement sur le fond, l'onde déferle.

Ondes d'oscillation. — Pour les ondes d'oscillation, on a constaté les particularités suivantes :

1° La vitesse des ondes d'oscillation ordinaires augmente avec l'importance des ondes, c'est-à-dire avec leur hauteur et leur volume ; la hauteur est la distance verticale qui sépare le *creux* du *sommet* de l'onde.

2° Leur volume diminue au fur et à mesure de leur propagation ;

3° Elles déferlent quand le rapport entre leur hauteur et la profondeur atteint une certaine limite ;

4° Elles déferlent également quand leur hauteur est moindre que le tiers de leur longueur. La longueur est la distance horizontale qui sépare les sommets de deux vagues consécutives ;

5° Lorsque la profondeur de l'eau dépasse celle dans laquelle l'agitation produite par le passage de l'onde est appréciable, la vitesse de propagation dépend de la longueur L de l'onde et de la durée T de son oscillation, c'est-à-dire du temps que met un sommet à se transporter à la place du précédent, relation exprimée par la formule

$$V^2 = \frac{g}{2\pi} L$$

6° La hauteur maxima d'une onde est liée à sa vitesse par la formule

$$h = \frac{2V^2}{g} = \frac{L}{\pi}$$

c'est-à-dire que la hauteur maxima est à peu près le tiers de la longueur ; au delà l'onde déferle.

CHAPITRE IV

MARÉES

Chaque jour, le long de nos côtes de l'Océan, la mer couvre et découvre successivement une partie de la plage qui a reçu le nom *d'estran*. L'ascension dure environ six heures; elle atteint à son maximum le niveau de *pleine mer* ; l'eau redescend ensuite pendant un laps de temps à peu près égal jusqu'au minimum de *basse mer*, et la montée recommence. Entre deux hautes mers, il s'écoule en moyenne 12 heures 25 minutes.

La marée montante s'appelle aussi *gagnant, flux* ou *flot ;* la marée descendante *perdant, reflux, ebbe* ou *jusant*. Les courbes que la mer dessine sur le rivage, aux points d'arrêt supérieur et inférieur, sont les *laisses* de haute et basse mer.

La marée totale ou *amplitude* est la différence de niveau entre la pleine mer et la basse mer suivante. On désigne sous le nom de *mer moyenne* la surface d'équilibre qui serait celle de la mer sans marée. Rigoureusement, c'est la surface qui sépare également les volumes de l'onde situés en dessus et en dessous. Elle se trouve, par suite, à un niveau un peu supérieur à celui de la demi-amplitude. M. Bouquet de la Grye a donné pour la déterminer la formule :

$$N = \frac{1}{16}\left[h_o + 4\,(H_1 + h_1) + 3\,(H_o + h_2) + H_2\right]$$

N niveau moyen de la mer

H_o, H_1, H_2, hauteurs de trois pleines mers consécutives

h_o, hauteur de la basse mer qui précède la première pleine mer H_o

h_1, h_2, les deux basses mers suivantes :

Le niveau moyen n'est d'ailleurs pas constant et varie, suivant les saisons, de plusieurs centimètres ; il est évident que dans les mers où les vents sont constants pendant une partie de l'année et refoulent alors les eaux sur un même point, le niveau moyen sera relevé en ce point durant cette période.

Si un jour la mer est pleine à midi, le lendemain elle le sera à midi 50 minutes ; il en est de même de la Lune. Le *jour-marée* est donc égal au *jour lunaire*, c'est-à-dire qu'un même intervalle de temps sépare deux pleines mers consécutives et deux passages consécutifs de la Lune au méridien d'un même lieu. L'amplitude des marées varie aussi avec les phases de notre satellite. Ces observations sont si frappantes que déjà Pline attribuait le phénomène à l'influence de la Lune ; mais l'explication scientifique n'en a été donnée que par Newton, après la découverte de la loi de la gravitation universelle : « Les corps semblent s'attirer en raison directe de leurs masses et en raison inverse du carré de leurs distances. »

THÉORIE DE NEWTON

Influence de la Lune. — Sur l'unité de masse m de la Terre, l'attraction de la Lune, située à la distance d, est $\frac{d}{m^2}$. La distance des deux astres est de 60 rayons terrestres R de centre en centre ; celle du centre de la Lune au point le plus rapproché de la Terre est de 59 R, au point le plus éloigné de 61 R. L'attraction en ces trois points respectifs est donc représentée par

$$\frac{m}{(59\ R)^2},\quad \frac{m}{(60\ R)^2},\quad \frac{m}{(61\ R)^2}$$

La différence entre les deux premières valeurs est de $\frac{1}{119}\frac{m}{R^2}$; entre les deux dernières de $\frac{1}{121}\frac{m}{R^2}$. Moyenne $\frac{1}{120}\frac{m}{R^2}$.

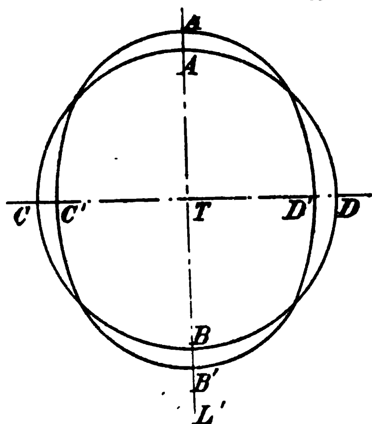


Fig. 8. — Effet de la Lune sur la mer.

Cette faible différence n'est guère que $\frac{1}{12\ 000\ 000}$ de la valeur de la pesanteur et ne saurait avoir d'action sur la croûte solide du globe ; mais elle est sensible sur les molécules liquides qui peuvent lui obéir. Supposons le globe terrestre immobile et entièrement recouvert d'une profonde couche d'eau (fig. 8). Les molécules A, situées le plus près de la Lune, et par conséquent plus attirées, se soulèveront en A' ; les plus éloignées B, moins soutenues par l'attraction, *tomberont* en *B'*.

Les choses se passeront donc comme s'il y avait deux Lunes, situées aux deux extrémités d'un même diamètre, mais l'une plus petite que l'autre, dans le rapport $\frac{119}{121}$.

Le gonflement en A' et B' a comme conséquence une dépression en C et D ; la masse liquide prend donc la forme d'un ellipsoïde A' D' B' C' dont le grand axe est dirigé vers notre satellite.

Influence de la rotation de la Terre. — La Terre tournant sur elle-même, chaque point de sa surface dirigé vers la Lune devient à son tour le sommet de l'ellipsoïde. Si la Lune est dans le plan de l'équateur le sommet se déplace suivant ce grand cercle, avec la vitesse angulaire de la terre, 450 mètres à la seconde. Si le satellite n'est pas dans ce plan, l'axe de l'ellipsoïde décrit une surface conique passant par le parallèle (tourné vers la Lune) que parcourt l'un des sommets du grand axe, tandis que le second sommet parcourt un parallèle situé dans l'autre hémisphère, à égale distance de l'équateur.

L'onde-marée se déplace donc en sens inverse de la rotation de la Terre, de l'est vers l'ouest, comme le fait en apparence la Lune.

Influence du Soleil. — Le Soleil exerce sur l'Océan une action semblable à celle de la Lune. Il est aisé de démontrer que si l'on appelle, R étant le rayon terrestre,

$m = 0{,}013$ et $a = 60R$ la masse de la Lune et sa distance à la Terre,

$M = 324\,430$ et $A = 23\,280R$ les mêmes éléments pour le Soleil, le rapport de l'action de la Lune à celle du Soleil est

$$\frac{m R}{a^3} : \frac{M R}{A^3} = \frac{m A^3}{M a^3} = \frac{0{,}013\,(23280\,R)^3}{324439\,(60\,R)^3} = 2{,}84$$

L'action de la Lune est donc $2\frac{1}{3}$ fois plus forte que celle du Soleil.

Position relative des astres. — *Avance et retard.* — Les deux astres changent sans cesse de position par rapport à la Terre. Il devrait donc se produire deux marées, dues chacune à l'influence de l'un d'eux.

En fait, les intumescences se confondent en une seule, qui se place dans une situation intermédiaire entre celles qu'occuperaient les deux primordiales. Il est aisé de se rendre compte que de la quadrature à la syzygie il y a *avance* de la marée, et *retard* de la syzygie à la

quadrature. L'écart n'est jamais considérable, à cause de la prépondérance de l'action de la Lune ; mais la différence entre les marées de deux jours successifs, qui devrait être de 50 minutes, varie en conséquence; elle n'est parfois que de 39 minutes aux syzygies et peut atteindre une heure un quart aux quadratures.

Amplitude. — La position relative des deux astres entraîne enfin des différences dans l'amplitude des marées. Leurs actions attractives s'ajoutent aux syzygies, quand ils sont sur le même diamètre, et se retranchent aux quadratures, quand ils se trouvent à angle droit. Les marées les plus fortes (marées de *vive eau*) se manifestent donc à la Pleine et à la Nouvelle Lune et les plus faibles (marées de *morte eau*) aux Premier et Dernier Quartiers.

L'amplitude des marées est encore influencée par diverses autres conditions, savoir :

Influence de la déclinaison. — Aux équinoxes, le Soleil étant dans l'équateur et la déclinaison de la Lune étant très faible, la marée résultante est très forte ; elle l'est encore plus pour l'Europe si la Lune est dans l'hémisphère boréal.

Influence de la parallaxe. — La distance des deux astres à la Terre est variable et leur parallaxe, c'est-à-dire l'angle sous lequel on verrait le rayon de la Terre du centre de l'astre considéré, change en proportion. C'est pendant l'hiver de l'hémisphère boréal que les parallaxes sont à leur maximum ; aussi est-ce à cette époque que l'amplitude est la plus prononcée sur nos côtes.

Il en résulte donc que les plus fortes marées sont pour l'Europe celles de l'équinoxe du printemps. La législation française a consacré par l'épithète de « limite du plus grand flot de mars » la laisse supérieure, qui sert à délimiter le domaine public maritime.

D'après M. Thiébaut, le plus grand flot de mars a un maximum tous les neuf ans, à cause de la révolution du périgée lunaire, qui s'effectue en 8 ans et 310 jours.

THÉORIE DYNAMIQUE DES MARÉES

La théorie de Newton, tout en rendant compte de l'ensemble du phénomène des marées, ne peut expliquer bien des points de détail, parce qu'elle part de la supposition d'un équilibre statique irréalisable

à cause des continuels déplacements des couches liquides sous l'action des astres attirants. Laplace, dans une admirable étude de mécanique céleste, a basé une théorie nouvelle sur l'équilibre dynamique des eaux de l'Océan.

Nous essaierons d'indiquer comment on peut concevoir le phénomène en tenant compte de l'incessant mouvement du liquide.

Fig. 9. — Théorie dynamique des marées.

Soient (fig. 9) L la Lune et M un point de la surface terrestre T. La distance est telle que la droite ML est presque parallèle à LT. La projection AB du grand cercle perpendiculaire à LT est donc aussi à peu près perpendiculaire à LA.

L'attraction sur les particules situées à droite du grand cercle projeté en AB est plus grande que sur celles de ce grand cercle ; elle est, au contraire, plus faible à gauche. La différence entre ces attractions sera donc dirigée en M vers L et peut être représentée par MM', en N elle sera dirigée en sens contraire et est figurée par NN'.

Ces deux forces peuvent se décomposer, l'une suivant la verticale MZ et la tangente MS, l'autre suivant NZ' et MS'. Le calcul indique que la composante verticale n'apporte qu'un changement inappréciable à l'intensité de la pesanteur ; mais la composante tangentielle est suffisante pour faire mouvoir horizontalement les particules mobiles de l'Océan.

On voit que dans l'hémisphère ADB, elles sont attirées vers le point D, et vers C dans l'hémisphère ACB. Le cercle projeté suivant AB sera une zone neutre.

La Terre tournant sur elle-même dans la direction CBDA, l'attraction de B vers D s'ajoutera au mouvement de la surface terrestre, et la vitesse s'accélérant de B vers D sera maxima en D.

Au contraire, le mouvement des particules liquides qui suivent la Terre de D en A sera retardé par l'attraction de A vers D, et la vitesse sera minima en A.

On démontrerait de même que la vitesse sera maxima en C et minima en B.

Maintenant, considérons deux points H, I, voisins dans le quadrant BD ; la vitesse est plus grande en I qu'en H ; donc en I, la mer déverse vers D plus d'eau qu'il ne lui en arrive de B : son niveau tendra donc à baisser. Ce raisonnement, exact dans tout ce quadrant, prouve que c'est en D que la différence entre le départ de l'eau et l'arrivée sera maxima ; c'est donc en D que la baisse sera le plus visible.

Un raisonnement identique prouve que la baisse a lieu également en C, et que la hausse se produira en A et en B. Donc, contrairement à ce qu'indique la théorie de l'équilibre statique, c'est le petit axe de l'ellipsoïde qui est dirigé vers l'astre attirant. La pleine mer ne se manifestera donc que six heures après le passage de la Lune au méridien.

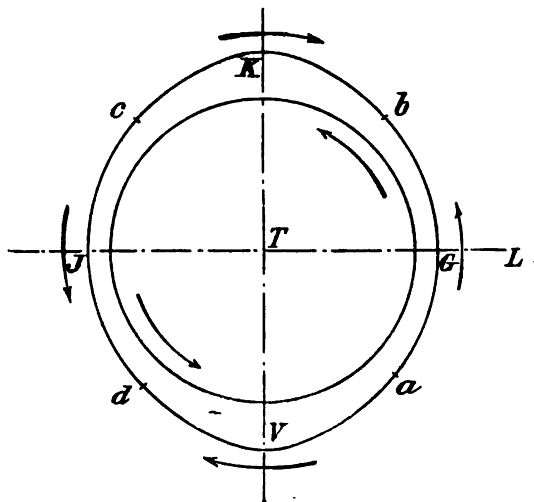


Fig. 10. — Théorie dynamique des marées.

En résumé, en G et en J (fig. 10), les molécules liquides, en outre du mouvement de l'ouest à l'est de la Terre, représenté par les flèches intérieures, en ont un propre, dirigé dans le même sens ; leur vitesse est donc plus grande que celle du globe, et la différence fait qu'elles semblent se diriger de l'ouest vers l'est. En K et V, leur vitesse est annulée, elles restent immobiles pendant que l'écorce du globe continuera à tourner sous elles ; elles semblent donc s'écouler de l'est vers l'ouest. C'est ce qu'indiquent les flèches extérieures. Aux points *a*, *b*, *c*, *d*, situés à trois heures des points G H I J, c'est-à-dire à

mi-marée, *il n'y aura aucun courant*, ce que démontrent les observations.

Formation et propagation de l'onde-marée. — En théorie, l'action de la Lune et du Soleil s'exerce donc dans la zone équatoriale bornée par le 28e parallèle, limite de la déclinaison de la Lune sur l'équateur céleste. La formation de l'onde entraîne la rupture d'équilibre de toutes les mers; mais l'analyse mathématique ne peut rendre compte des phénomènes locaux, influencés par de nombreuses causes. On a supposé, pour établir la théorie, le globe recouvert d'une couche d'eau continue et assez profonde pour permettre le libre jeu des attractions. La présence des continents, les différences de profondeur des mers entraînent de grandes modifications du mouvement.

La propagation de la force d'attraction des astres est bien presque instantanée, mais il faut du temps à la mer pour y obéir, ce qui est une première cause de retard dans la formation de l'onde. Celle qui parcourt nos côtes vient de l'Océan Atlantique qui, étant large de 45° aux latitudes extrêmes d'action de la Lune, ne met que trois heures à passer devant notre satellite; or, la vitesse de la terre étant de 450 mètres à la seconde, il faudrait à l'Océan, d'après la formule de la célérité $v = \sqrt{gh}$ une profondeur de 20 450 mètres pour que l'onde pût suivre ce mouvement. L'action de la Lune, interceptée d'abord par le continent africain, ne peut d'ailleurs déterminer immédiatement la production de l'intumescence.

L'onde qui va de l'équateur vers les pôles rencontre dans l'Atlantique des fonds de 3 à 4000 mètres en moyenne; elle ne peut y acquérir qu'une célérité de 175 à 200 mètres par seconde. Pour arriver au 50e parallèle, à Brest, par exemple, soit à 3 000 milles de distance, il lui faut une dizaine d'heures. Or, ce qui est flux sur nos côtes n'est que le jusant de la haute mer produite dans la zone équatoriale. Si enfin on admet que l'intumescence se forme au milieu de l'Océan, c'est-à-dire vers le 30e méridien où l'heure est en retard de 2 heures sur la nôtre, on voit qu'il faut à l'onde, formée à l'équateur 6 heures après le passage de la Lune au zénith, une vingtaine d'heures pour qu'elle puisse nous arriver.

Il y a de nombreuses autres causes de retard, parmi lesquelles il faut ranger le choc qui résulte de la rencontre des ondes attirées de tous les points de l'horizon à l'équateur, choc qui est d'ailleurs la cause même de l'intumescence.

Retard des marées. — En réalité, la marée retarde sur nos côtes de 36 à 40 heures ; on en a la preuve par l'arrivée, au bout de ce laps de temps après les syzygies, de la marée la plus forte. Pour expliquer ce retard, bien naturel, Whewell, qui a fait une étude spéciale du phénomène, pensait que l'intumescence ne se produisait que dans le vaste Océan Pacifique, d'où la vague-marée se répandait dans les autres mers. Il croyait avoir trouvé à peu de distance des côtes occidentales de l'Amérique du Sud le point originaire. S'il en était ainsi, sur les côtes du Chili la plus forte marée se produirait le jour même de la syzygie et la plus faible le jour de la quadrature.

Nous avons étudié la question pendant plusieurs années, sans résultat. La plus forte marée a été constatée au Chili dans l'intervalle qui s'étend depuis la veille de la syzygie jusqu'à 5 jours après. L'amplitude moyenne sur cette côte est 1,50 *m*, de sorte que la différence entre deux marées consécutives n'est que de quelques centimètres. Le vent violent qui y règne sans cesse suffit à expliquer les irrégularités du niveau. Toutes choses égales d'ailleurs, c'est le plus souvent un ou deux jours après la syzygie qu'on constate la marée la plus élevée.

Etablissement du Port. — Lignes cotidales. — A l'époque des équinoxes, le jour de la Nouvelle Lune, les deux astres étant dans l'équateur et à leurs moyennes distances et passant ensemble à midi vrai, on appelle *Etablissement du port* considéré l'heure en ce point de la pleine mer qui suit ce passage.

Connaissant l'heure de l'établissement d'un port, des formules spéciales, où entrent les divers facteurs qui influent sur les marées, donnent l'heure de la pleine mer à une date quelconque. On les trouve pour la France dans l'*Annuaire du Bureau des longitudes* avec les tables nécessaires à leur application. Chaque pays publie d'ailleurs un *Annuaire des marées* qui donne l'heure et le coefficient des marées à toute date.

Pour suivre la progression de l'onde-marée sur une côte, il n'y a qu'à comparer les établissements des ports qu'elle rencontre. Ainsi, le long de la Manche, on la voit arriver successivement après Brest (3,46 *h*) à Saint-Malo (6,10 *h*), Cherbourg (7,58 *h*), Le Havre (9,53 *h*), Dieppe (11,8 *h*), etc. On suit de même sa marche sur la rive anglaise opposée.

Whewell a appelé *lignes cotidales* (de l'anglais *tide*, marée), les courbes qui rejoignent deux ports d'établissement égal, c'est-à-dire où

la pleine mer a lieu au même instant, (en réduisant, bien entendu, les heures locales à celle du méridien initial, Paris ou Greenwich). Cette courbe indique la situation du sommet de l'onde-marée à l'heure indiquée et elle dessine son mode de progression. La figure 11 donne les lignes cotidales sur les côtes anglo-françaises; elles sont convexes en avant, à cause de la plus grande rapidité de propagation dans les endroits profonds.



Fig. 11.
Lignes cotidales sur les côtes de la Manche et de la Mer du Nord.

Ces courbes servent également à étudier les dimensions de l'onde qui se dirige vers nos côtes; on reconnaît ainsi qu'un sommet étant au Sénégal, l'autre est un peu au nord de Dunkerque; c'est donc là la longueur d'une onde. En plein Océan, elle est encore plus considérable.

Whewell a aussi donné des lignes cotidales pour le globe entier; mais à l'époque où il en a dressé le tableau (1833) on n'avait pas encore assez de renseignements précis pour tenter un pareil travail, et il en est presque encore de même aujourd'hui.

Il ne suffit pas, en effet, de réunir par une courbe les ports d'égal établissement; des conditions locales produisent parfois des anomalies encore fort peu connues.

Ainsi, sur la côte du Pacifique, dans l'Amérique du Sud, on voit nettement la marche de l'onde-marée de l'équateur vers le sud. Elle passe, par exemple, à 3,20 *h* à Payta (5° lat. S.) et arrive à 10 heures à Mejillones del Sur (24° lat. S.). Là, l'onde-marée semble s'arrêter. A Copiapo (28° lat. S.), l'établissement du port est 8,30 *h*; de là, l'heure des pleines mers remonte vers le nord jusqu'à Mejillones d'une part, et d'autre part, l'onde reprend sa marche vers le sud.

On peut expliquer cette irrégularité par la forme de la côte et la profondeur de la mer. L'onde venant du Pérou se dirige droit sur Copiapo par des fonds qui dépassent 6000 mètres; au contraire, pour atteindre Mejillones, l'onde dérivée qui longe la côte est obligée à un long détour, dans de faibles profondeurs.

L'onde principale arrive donc à Copiapo avant que l'autre ait pu élever le niveau devant Mejillones et elle doit envoyer une branche dérivée vers ce dernier point.

Du Callao à Copiapo, la distance de 2000 kilomètres est parcourue en deux heures et demie, avec une vitesse de 220 mètres à la seconde; les 1700 kilomètres qui séparent le Callao de Mejillones sont franchis en quatre heures à raison de 120 mètres par seconde. La formule $v = \sqrt{g\text{H}}$ donne pour les profondeurs moyennes 5000 mètres dans le premier cas et 1500 mètres dans le second, ce qui rentre bien dans les valeurs réelles.

On trouve souvent de tels exemples : l'étude des lignes cotidales doit donc être abordée avec prudence. La connaissance du sens de la propagation de la marée sur les côtes est pourtant indispensable, car elle détermine des courants dont l'influence peut être notable.

Unité de hauteur. — Aux syzygies, si les astres sont dans l'équateur et à leurs moyennes distances, la demi-amplitude de l'onde résultante a reçu le nom d'*unité de hauteur*. On rapporte les hauteurs des marées des autres jours à cette unité, en leur affectant des coefficients. Quand les distances des astres changent, ainsi que les phases, etc. ces coefficients varient. Pour les marées de syzygies, le coefficient maximum s'élève à 1,18 et le minimum à 0,68.

L'unité des hauteurs varie dans chaque port et ne peut être déterminée que par des observations répétées. L'amplitude de la marée, en un jour donné, est égale au double du produit de l'unité de hauteur par le coefficient du jour, qu'on trouve dans les *Annuaires* spéciaux.

Laplace a donné pour la demi-marée y d'une syzygie en fonction de l'unité de hauteur y_o, une formule qui, réduite à ses termes essentiels, est

$$y = 0,245\ y_o\ (i^3 \cos^2 v + 3\ i'^3 \cos^2 v')$$

v et v' déclinaisons de ce jour du Soleil et de la Lune, les déclinaisons boréales étant comptées positives et les australes négatives;

i, rapport de la moyenne distance du Soleil à sa distance du jour;

i', parallaxe du jour de la Lune, divisée par la moyenne de cette parallaxe.

En France, l'unité de hauteur est différente pour chaque port; elle est de 1,40 *m* à l'entrée de l'Adour et de 6,15 *m* à Granville. Pour une marée de coefficient 1,18, l'amplitude totale est de 3,276 *m* dans la première localité et de 14,39 *m* dans la seconde. Sur notre côte de l'Atlantique, l'amplitude des marées augmente à peu près régulièrement du sud au nord. Elle croît aussi de Brest à Saint-Malo et Granville puis diminue de moitié jusqu'à Cherbourg et Barfleur. Elle augmente de nouveau jusqu'à Cayeux, pour s'amoindrir ensuite jusqu'à Dunkerque. La côte anglaise de la Manche présente la même succession de minima et de maxima, qui est le résultat de la rencontre des deux ondes venant l'une de l'Atlantique, l'autre de la Mer du Nord.

Il est donc impossible de savoir l'amplitude de la marée dans un port donné, même quand on la connaîtrait dans un port voisin. Ainsi à la presqu île de Portland, en Angleterre, il y a entre la hauteur de la marée à l'est et à l'ouest de cette étroite langue de terre une différence qui s'élève parfois à près de 2 mètres.

D'une mer à l'autre, l'impossibilité est encore plus manifeste. A Colon, dans le golfe du Mexique, l'amplitude est de 30 *cm*; de l'autre côté de l'isthme, à Panama, elle atteint 6 mètres.

Ondes diurnes et semi-diurnes. — Les formules analytiques du phénomène des marées contiennent des expressions à chaque instant variables; les unes reprennent la même valeur après une révolution complète de la Terre, les autres après une demi-révolution. Les premières, appelées forces *diurnes*, ont en général peu d'importance et s'annulent même pour l'un des astres quand il est dans l'équateur. Les autres, forces *semi-diurnes*, ne s'annulent jamais; leur action est prépondérante, quoique parfois masquée.

Les deux marées d'un même jour doivent donc être d'inégale ampli-

tude et elles le sont en réalité; mais en Europe les forces diurnes sont si faibles qu'on n'en tient presque pas compte dans le calcul des hauteurs des marées. Dans d'autres pays, on observe de grandes différences; elles atteignent 40 *cm* sur la côte Atlantique et 1,10 *m* sur la côte Pacifique des Etats-Unis; sur la rive occidentale de l'Amérique du Sud elle dépasse 60 *cm*.

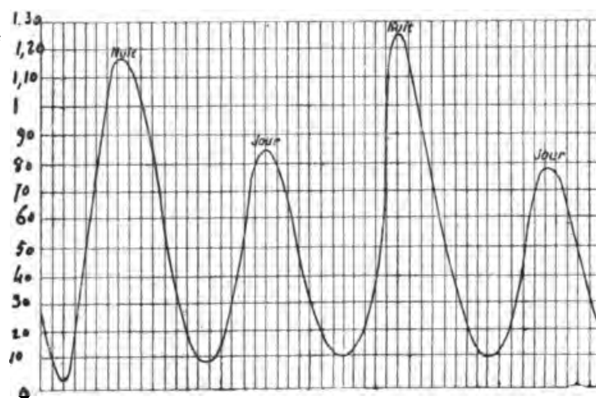


Fig. 12. — Courbe des marées à Valdivia.

Nous donnons, figure 12, la courbe observée sur le fleuve Valdivia au Chili, en décembre 1891. On voit que c'est le jusant de la marée nocturne qui a le plus d'importance. Sur certains points de la côte américaine du Pacifique, la différence entre la basse mer du jour et la haute mer suivante est si faible que le niveau change à peine, ce qui produit une *étale* de basse mer de plusieurs heures.

On peut attribuer en partie ces faits à la profondeur de la mer. Quand une onde se propage dans l'eau peu profonde elle s'élève beaucoup. Sur nos côtes, la marée qui vient du centre de l'Atlantique, où elle n'a guère que 60 *cm* de hauteur, atteint en certains points 10 à 12 mètres. Dans ces conditions, l'action primordiale des astres est tellement intensifiée que les petites différences disparaissent. Là où la mer est creuse, au contraire, la marée reste faible et l'influence des astres se transmet avec toutes ses nuances.

Mesure des marées. — Pour observer les dénivellations de la mer, on peut se contenter d'abord d'une règle divisée en centimètres, appliquée verticalement dans un bassin ou une baie tranquille; on a ainsi une approximation suffisante pour un avant-projet; mais ce procédé exige l'intervention continue d'un observateur.

Nous avons établi pour le même usage un appareil enregistreur rudimentaire. Une règle divisée en bois, de 10 centimètres de largeur, et de longueur proportionnée à l'importance de la marée, est fixée avec une inclinaison de 45° sous un abri. Un petit chariot monté sur des roulettes et pesamment chargé, roule sur cette règle munie de rebords latéraux pour guider le mouvement. L'extrémité supérieure du chariot est reliée par une chaine à un flotteur; une poulie verticale très mobile guide la chaine qui doit être souple et inextensible. Un crayon chargé passe à frottement doux à travers la plaque supérieure du chariot et enregistre sur un papier la longueur parcourue. On peut, s'il est nécessaire, réduire l'amplitude par un jeu de poulies.

Marégraphe. — L'appareil précédent ne donne que les niveaux maximum et minimum. Pour connaître les circonstances de la marée, on emploie un marégraphe enregistreur, installé dans un puits mis en communication avec le bassin par un conduit très étroit, pour se mettre à l'abri de l'agitation. Le conduit doit, d'ailleurs, pouvoir être aisément nettoyé.

On remplace avec avantage le puits par un tuyau en cuivre de fort diamètre, percé de trous à sa partie inférieure et protégé par un tube en bois; les trous doivent être facilement nettoyables.

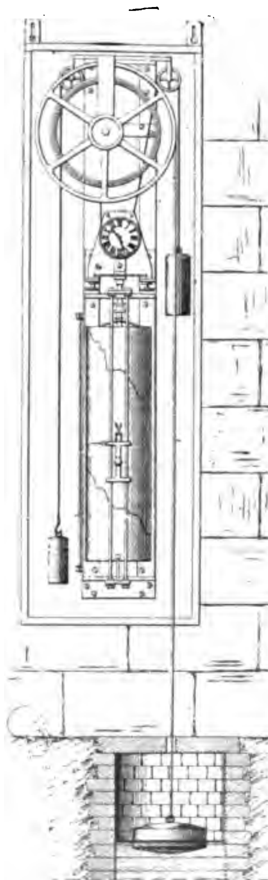


Fig. 13. — Marégraphe.

Nous donnons, figure 13, le dessin de l'instrument construit pour nous par M. Collin. Le flotteur est supporté par une chainette en cuivre qui s'enroule sur la poulie A, dont l'axe porte deux autres poulies B et D. Sur B, placée en arrière, passe une corde qui supporte le contrepoids C. Quand le niveau descend, le flotteur entraine à droite la roue A; le contrepoids, réglé en conséquence, est soulevé. Quand la marée monte, le flotteur la suit et le contrepoids fait tourner à gauche la roue A.

Le diamètre de la poulie D, antérieure, est par rapport à celui de la

roue A une fraction $\frac{1}{m}$ calculée selon l'amplitude de la marée. Cette poulie porte un ruban d'acier flexible E, terminé par un porte-crayon guidé dans sa course sur les tiges H et I.

Un mouvement d'horlogerie fait tourner devant le crayon, en 24 heures, un cylindre M sur lequel est collé un papier quadrillé repéré.

Le crayon y trace une courbe dont les abscisses sont les heures et les ordonnées les hauteurs de marée, à l'échelle $\frac{1}{m}$.

A Ostende, les traits sont gravés par un diamant sur une feuille en zinc montée sur un cylindre vertical.

Marégraphe de sir W. Thompson. — Pour éviter d'avoir à changer chaque jour le papier, MM. Negretti et Zambra de Londres

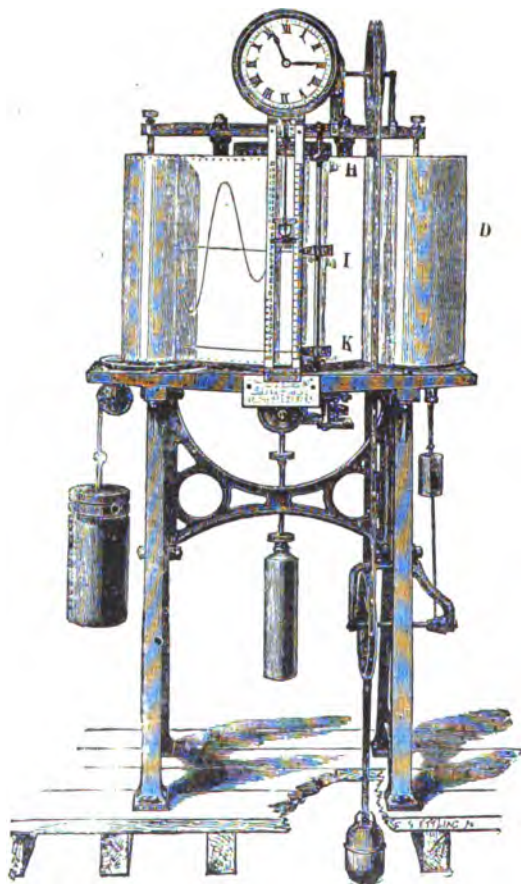


Fig. 14. — Marégraphe de Lord Kelvin.

construisent le marégraphe de sir W. Thompson (Lord Kelvin) représenté par la figure 14.

Un rouleau de papier est enroulé sur le tambour D. Des pointes fixées sur le tambour central, qui est actionné par un mouvement d'horlogerie, font passer le papier du cylindre D sur celui de gauche C où il s'enroule à son tour. Il est appliqué par des roulettes H H contre le tambour central, le long duquel glisse le crayon. Les roues sont portées sur un axe auquel sont fixés deux crayons I K, qui servent à repérer les courbes. L'uniformité du mouvement est donc assurée, de sorte que la longueur déroulée en 24 heures est constante malgré le changement de diamètre des rouleaux.

Marégraphe totalisateur. (fig. 15). — On a installé à Marseille un marégraphe totalisateur faisant automatiquement le planimétrage des courbes de marée. Un flotteur cylindrique F, en cuivre,

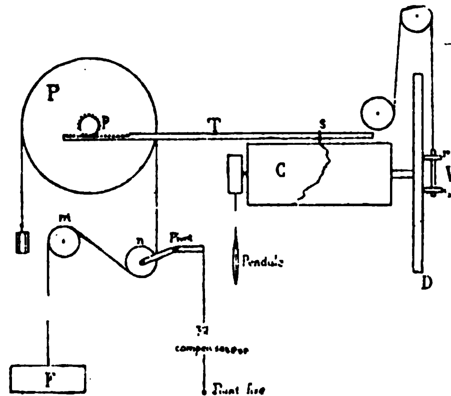


Fig. 15. — Marégraphe totalisateur.
F, Flotteur. P, Poulie motrice. T, Tige porte-stylet. S, Stylet enregistreur.
C, Cylindre d'enregistrement. D, Disque tournant en verre dépoli.
r_1, r_2, Roulettes totalisatrices, portées par le chariot V.

de 90 centimètres de diamètre et 10 centimètres de hauteur, actionne par un fil en bronze de 1/2 millimètre de diamètre une poulie P portant un pignon concentrique *p*. Celui-ci met en mouvement la crémaillère T portant un stylet *s* qui trace la courbe des marées au 1/10 sur le cylindre enregistreur C.

La tige à crémaillère conduit également un chariot V muni d'une roulette *r* en agate qui s'appuie contre un disque de verre D dépoli tournant avec le cylindre C. Cette roulette tourne sur elle-même avec une vitesse proportionnelle à la distance de son point de contact au centre, et actionne un compteur de tours.

L'angle de rotation de cette roulette, pendant un temps très court,

est proportionnel à l'aire élémentaire comprise entre les deux ordonnées correspondantes de la courbe des marées. Le quotient du nombre de tours de la roulette par celui du disque donne le niveau moyen.

Médimarémètre (fig. 16). — On trouve plus simplement ce niveau moyen par le médimarémètre de M. Lallemand, composé d'un tube étanche fixé au quai, et communiquant avec la mer par un tuyau B terminé par une crépine pleine de sable et séparée du tube par une

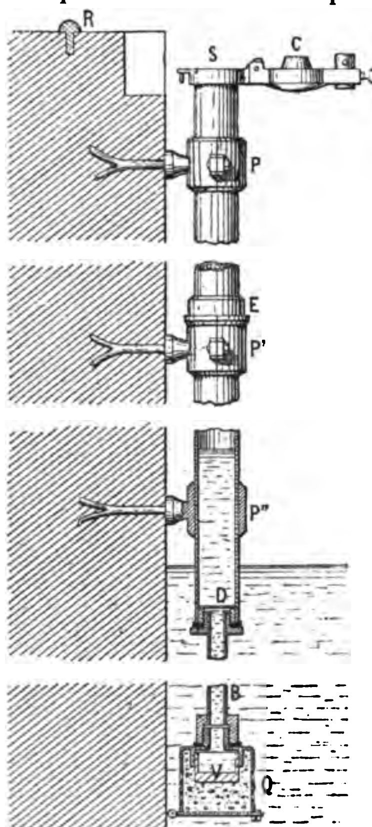


Fig. 16. — Médimarémètre.

cloison en porcelaine dégourdie. L'oscillation de la mer est réduite à une quantité insignifiante dans le tube, de sorte qu'on détermine le niveau moyen par la moyenne des hauteurs observées en introduisant dans le tube une sonde portant une bande de papier sensibilisé au sulfate de fer et à la noix de galle et qui noircit au contact de l'eau.

Courbe des marées (fig. 17 et 18). — Les marégraphes inscrivent une courbe dont les abscisses sont les temps et les hauteurs les

niveaux correspondants. Cette courbe affecte la forme d'une sinusoïde,

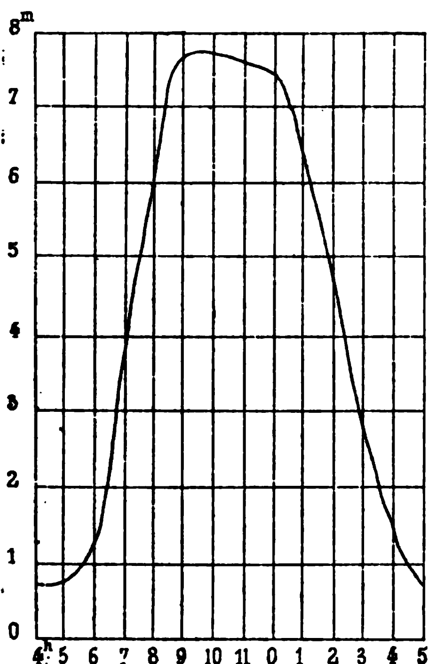


Fig. 17.
Courbe de marée de vive eau au Havre.

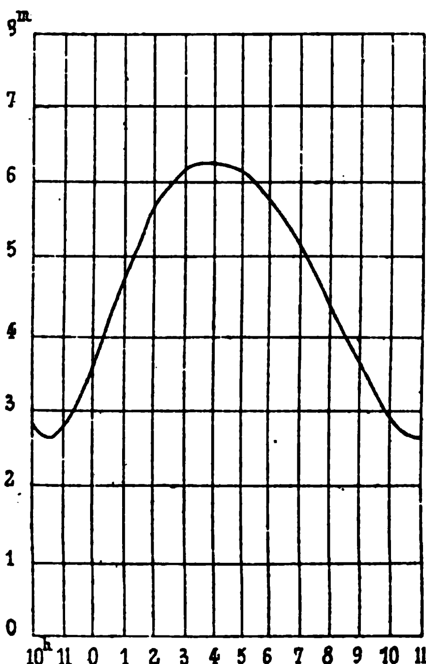


Fig. 18.
Courbe des marées de morte eau au Havre.

mais les deux branches ascendantes, représentant le flux et le reflux, sont souvent inégales.

Ondes sous-multiples. — Interférences. — En comparant la courbe des marées du Havre avec la sinusoïde la plus ressemblante, Chazallon remarqua que ces courbes se coupent de telle façon que si l'on complète la formule de la première sinusoïde par les termes d'une seconde, de période égale à la moitié du temps, on arrive à une courbe plus rapprochée de celle du marégraphe. On obtient enfin une courbe semblable à celle-ci par l'adjonction des termes de sinusoïdes de périodes égales au sixième, puis au huitième du temps. Il en conclut que la marée du Havre est formée de trois ondes composées.

C'est que l'onde-marée, après avoir doublé la presqu'île du Cotentin, se bifurque en deux branches. La première se rend directement sur le cap d'Antifer et se divise encore en deux ondes qui se dirigent l'une vers le nord, l'autre vers le sud. Celle-ci passe au Havre et y produit la pleine mer. La seconde branche qui part du cap Barfleur longe les

côtes du Calvados et vient déterminer une seconde pleine mer devant le Havre. Les deux ondes entrent également dans la Seine; puis le remplissage de l'estuaire achevé, le trop plein passe encore devant le Havre. Ce sont ces ondes dérivées que constate la courbe des marées, c'est à elles que le Havre doit de garder pendant deux heures l'*étale* de pleine mer, c'est-à-dire le niveau maximum, ce qui lui donne un avantage particulier pour la manœuvre des navires.

Ces ondes sous-multiples se rencontrent souvent. C'est ainsi qu'à Southampton il y a deux pleines mers consécutives, produites l'une par l'onde qui passe entre l'île de Wight et la terre, l'autre par celle qui contourne l'île et revient de l'est. A Portsmouth, on constate trois maxima; le troisième est dû aux eaux qui, après avoir rempli le havre de Langston, passent dans celui de Portsmouth.

A Rochefort, en morte eau, il se produit deux ascensions de la mer séparées par une dépression de 30 *cm*; elle est plus accentuée en amont; l'intervalle de temps qui sépare les deux maxima est de trois heures environ. Cette dépression se produit sensiblement à la même heure chaque jour; les choses se passent comme si la marée lunaire composait son action avec celle d'une marée solaire dont la basse mer, par suite du retard du jour lunaire, se trouverait placée d'abord sur la branche ascendante, puis sur la branche descendante de l'onde lunaire (M. Polony). Le phénomène est dû à l'interférence de deux ondes entrées l'une par le pertuis d'Antioche, l'autre par celui de Maumusson.

En Angleterre, l'onde dérivée par l'île de Wight s'étend jusqu'à Portland; mais à l'ouest du cap Saint-Alban, elle arrive à peu d'intervalle de la basse mer, et produit une petite élévation à la suite de laquelle le niveau s'abaisse de nouveau, ce qui fait dire qu'il y a deux basses mers; le même fait se produit à l'embouchure du canal de Rotterdam à la mer.

Les différences de l'unité de hauteur des marées proviennent souvent de la rencontre d'ondes multiples. Quand deux ondes venant de directions différentes font converger en un même point leur crête, les hauteurs s'ajoutent et il en résulte de fortes marées. Si, au contraire, la pleine mer de l'une rencontre la basse mer de l'autre, son niveau s'abaisse, et l'on conçoit que si les deux ondes sont égales, elles s'annulent; c'est ce phénomène auquel on a donné le nom d'*interférence*.

Devant Granville le flot, rencontrant une série d'écueils (Chausey,

Jersey, les Ecrehou, les Minquiers), se partage en deux ondes dont l'une passe entre l'obstacle et la côte de Bretagne et dont la crête rencontre, à Granville même, celle d'une autre provenant de l'onde principale entrée dans la baie du Mont-Saint-Michel; c'est ce qui explique que l'unité de hauteur y soit la plus élevée de nos côtes.

Au contraire, dans la mer d'Irlande, de Courtown à Arklow, situé à 40 milles au sud de Dublin, la marée ne se fait guère sentir ; c'est que l'onde de l'Atlantique est séparée en deux par l'Irlande ; l'une pénètre par le sud, l'autre par le nord, après avoir doublé l'île. La crête de l'une rencontre le creux de l'autre à Courtown et elles s'annulent.

Sur la côte anglaise à l'est, ce sont au contraire les sommets qui se juxtaposent, et la marée de Liverpool atteint 8,50 *m*.

La marée de la Mer du Nord est produite sur la côte anglaise par une onde dérivée qui a contourné toute l'Angleterre et vient du sud vers le nord ; elle rencontre l'onde qui, traversant le Pas-de-Calais, se propage surtout vers les côtes belge et hollandaise. Il y a là également des phénomènes d'interférence très notables. Il est inutile d'insister sur des faits très fréquents partout où une île, un lac, un golfe, un cap interrompent la libre propagation de l'onde-marée.

Action du vent et de la pression atmosphérique. — Le vent produit parfois de grandes différences dans l'amplitude des marées.

M. Wheeler, se plaçant à un point de vue pratique, a mis la question à l'ordre du jour de l'Association Britannique en 1895. Il s'agissait de savoir si l'on pouvait à coup sûr pronostiquer, d'après la force du vent, la variation de hauteur d'une marée, changement important à connaître pour la manœuvre des navires à l'entrée d'un port. Le rapport d'une Commission, lu au Congrès de Liverpool en 1896, donne les conclusions suivantes, d'après les observations de cinq ports anglais.

I. — Les marées sont influencées par la pression atmosphérique et le vent dans une mesure qui affecte considérablement leur hauteur.

II. — Le vent affecte les marées d'environ un quart de leur hauteur.

III. — La pression atmosphérique qui influence les marées agit sur une étendue si vaste que les indications locales données par le baromètre dans un port donné ne peuvent servir de base à la détermination de l'effet sur la marée dans ce port.

IV. — Bien que, en moyenne, on puisse établir une connexion directe

entre la force et la direction du vent et la variation de hauteur des marées, cependant il y a de si notables écarts dans les résultats moyens quand on les applique à des marées particulières, qu'on ne peut établir aucune formule certaine pour indiquer la variation de hauteur d'une marée due à une force donnée de vent.

V. — Les résultats donnés dans les tables relatives à la pression atmosphérique indiquent que l'effet de cette pression est plus grand qu'on ne l'admet généralement. Une variation d'un demi-pouce sur la pression moyenne cause une variation de 15 pouces sur la hauteur des marées (1).

On a parfois dit qu'une marée exceptionnellement haute était suivie d'une basse mer correspondante. Les recherches des ingénieurs hollandais sur leurs côtes indiquent que l'effet des fortes brises sur les marées est d'élever aussi bien le niveau inférieur que le supérieur.

On a constaté des différences en plus de 2,43 *m* à Plymouth, de 2 mètres à Liverpool et Hull, de 2,15 *m* à Lynn et 2,40 *m* à Yarmouth.

Marées de la Méditerranée. — La marée est peu sensible dans la Méditerranée; on estime que l'étendue de cette mer n'est pas suffisante pour que l'action des astres s'y fasse sentir. En certains points, cette action est tellement masquée par celle du vent ou de la pression atmosphérique qu'on ne peut la reconnaître. Mais on l'observe au contraire fort bien dans d'autres ports, dont on a pu fixer l'établissement.

De la comparaison de ces heures on a parfois conclu que la Méditerranée peut être considérée comme formée de deux bassins séparés par la Sicile et que dans chacun d'eux la marée marche de l'ouest vers l'est en sens inverse du mouvement apparent de la lune, ce qui prouverait qu'elle est une dérivation de l'onde de l'Atlantique, entrée par le détroit de Gibraltar.

Mais les différences dans les établissements de ports ne sont pas régulières et peuvent s'expliquer également par des ondes formées dans le milieu de chacun des bassins et gagnant ensuite les côtes au gré des profondeurs, des obstacles, etc. Ce qui doit exclure l'idée de la dérivation de l'Atlantique, c'est qu'à Toulon, à Port-Saïd, à Venise, etc., les marées de vive eau ont lieu le jour même des syzygies et celles de morte eau le jour des quadratures. Il devrait y avoir plus de quarante heures de retard dans l'hypothèse de l'onde dérivée.

(1) La hauteur n'est d'ailleurs pas toujours en raison inverse de la pression.

Le peu d'étendue du bassin de la Méditerranée n'est pas une raison suffisante pour écarter l'idée d'une onde-marée propre, car on a constaté des marées de trois centimètres dans le lac Michigan.

Dans la Méditerranée, en dehors de l'action lunaire, les dénivellations sont dues surtout à l'action des vents et de la pression atmosphérique. A Oran, où les différences de hauteur atteignent parfois 1 mètre, les eaux sont basses de janvier à juillet et hautes durant les six autres mois. Le niveau monte presque toujours quand le vent souffle frais de l'ouest et baisse souvent avec le vent d'est. Les variations, maxima en hiver, suivent avec une régularité remarquable celles du baromètre. C'est aussi ce qu'on observe à Ajaccio, où les dénivellations ne dépassent guère 60 *cm*.

Il n'y a de marées notables dans la Méditerranée que dans le golfe de Tunis et au fond de l'Adriatique. Pour Venise, nous devons à l'obligeance de M. l'Ingénieur en chef Alberto Torri, directeur des travaux du port, les renseignements suivants :

L'établissement du port est 10,30 *h*; l'amplitude oscille entre 71 et 40 *cm* avec une moyenne de 57 *cm*; sous l'influence du vent elle atteint 1,20 *m*. La plus forte observée a été de 2,77 *m* dont 1,32 *m* au-dessus et 1,45 *m* au-dessous du niveau moyen.

La plus haute marée arrive le jour même de la syzygie.

Anomalies des marées. — Le golfe du Mexique est borné au nord-est par la côte occidentale de la Floride. Sur cette côte domine l'onde-marée qui a pénétré par le détroit situé entre la Floride et Cuba; il s'y manifeste chaque jour deux marées régulières, depuis Key-West jusqu'à Saint-Marks; les établissements de port varient de la première de ces localités jusqu'à la seconde de 9,30 *h* à 13,58 *h* et les amplitudes vont en augmentant de 40 *cm* à 75 *cm*.

Mais à partir de ce point s'effectue un changement complet : il n'existe plus à l'ouest, par jour lunaire, qu'une seule marée, excepté aux époques où la Lune est dans l'équateur et où il se produit deux faibles ondulations.

Dans le golfe du Tonkin il n'y a également qu'une marée quotidienne. Pour expliquer cette anomalie on a pensé que l'onde diurne subsiste seule, l'onde semi-diurne disparaissant par suite d'une interférence analogue à celle constatée sur la côte d'Irlande.

Mais l'interférence annule les deux marées dans la mer d'Irlande,

et il est difficile de comprendre pourquoi une seulement disparaîtrait dans les golfes du Mexique et du Tonkin. Pour le premier, l'explication suivante paraît la plus probable : Extérieurement au golfe, les deux marées d'un même jour sont inégales; il est possible que la plus forte détermine dans le golfe un afflux d'eau qui n'a pas le temps de s'écouler durant le jusant avant l'arrivée de l'onde suivante, dont le sommet n'atteint même pas le niveau où se trouve encore la précédente. Quand la Lune est dans l'équateur, la différence d'amplitude disparaît et les deux ondulations peuvent se produire.

Les mêmes faits s'observent dans diverses baies de l'Australie et à Singapour.

A Papeete (Taïti), la pleine mer a lieu tous les jours à 2 heures de l'après-midi. M. Hatt pense que des faits de ce genre pourraient s'expliquer par une influence thermo-atmosphérique se manifestant seule aux mêmes heures de la journée, après interférence des deux ondes-marées.

Dans le canal de l'Euripe, entre la terre et Négrepont, il y a par jour 14 flux et reflux. Sont-ils dus à des ondes dérivées multiples produites par les îles de l'Archipel? Sont-ce des *seiches* comme celles que l'on observe dans les lacs de Suisse?

A Sydney, les marées de nuit sont plus hautes que celles du jour dans l'hiver et c'est le contraire en été; on observe aussi les mêmes faits dans divers points des canaux du sud du Chili (estuaire des Eléphants), à Vancouver, etc. Les deux marées sont égales aux équinoxes.

Ras de marée. — On désigne ainsi trois sortes de phénomènes bien distincts.

Lorsque des courants, produits par les marées ou toute autre cause, sont resserrés entre des terres ou des écueils, ils acquièrent une vitesse considérable et prennent le nom de *ras*. Les plus célèbres en France sont le ras Blanchard, ceux d'Audierne et de l'île d'Ouessant, au sud de laquelle se trouve le courant du Fromveur (9 nœuds) et au nord le courant du Florus (10 nœuds).

On en cite près des « Pentland Skerries » au nord-est de l'Ecosse, qui atteignent 12 nœuds, et dans la baie de Pentland, de plus de 10 nœuds.

On donne encore ce nom à des marées extraordinaires, peut-être occasionnées par des tremblements de terre.

Dans la mer des Indes, à l'île de la Réunion, on voit souvent la mer,

tranquille au large, soulevée en tempête dans une zone de 150 à 200 mètres autour de la côte. Ces ras de marée sont dus, paraît-il, aux vagues de cyclones qui passent à de grandes distances et qui, à peine sensibles dans les grands fonds, deviennent énormes en approchant des rivages. Nous avons constaté que pendant la durée de ces phénomènes, durée qui est parfois de plusieurs jours, la marée se fait à peine sentir.

Marées sur les côtes. — Dans les océans loin des côtes, le mouvement de l'onde-marée est purement ondulatoire; on conçoit que d'ailleurs l'étude détaillée n'en a pu être faite. Lorsqu'elle entre dans des mers peu profondes et surtout dans les baies, elle subit des modifications dont il est aisé de se rendre compte.

D'abord, quand elle pénètre dans les baies en forme d'entonnoir, elle s'élève comme toutes les ondes; c'est ce qui a lieu en France au Mont Saint-Michel et dans la Nouvelle-Ecosse à la baie de Fundy, où son amplitude à l'extrémité atteint près de 15 mètres, tandis qu'elle n'est que de quelques mètres à l'entrée.

A chaque changement de direction de rivage, à chaque cap, à chaque crique, l'onde se bifurque. Une portion suit directement sa marche, tandis que l'autre contourne l'obstacle ou se répand dans l'espace ouvert devant elle. Il en résulte des ondulations, égales ou non, qui se rejoignant, s'entrecroisent et produisent les interférences que nous avons déjà étudiées.

Le mouvement ondulatoire se complique encore d'un phénomène accessoire, l'écoulement de l'eau, déterminé par la simple action de la pesanteur. La mer ne peut recouvrir un estuaire, tout à l'heure sec, qu'en y faisant pénétrer un volume de liquide, qui produit un courant.

Marée dans un bassin relié à la mer par un canal. — Supposons un grand lac dont le niveau est le même que celui de la pleine mer, situé à quelques kilomètres de la côte. Relions-le à l'océan par un canal ayant par exemple les dimensions primitives du canal de Suez. Après la jonction, quels phénomènes observera-t-on? Il se produira dans le chenal des courants alternatifs; suivant la marée, le lac se videra ou se remplira. Le calcul démontre les faits suivants :

1° Pendant les premières marées après l'ouverture, la quantité d'eau écoulée du lac durant le jusant est plus considérable que celle ramenée

par le flot, et le niveau des pleines mers dans le bassin baisse peu à peu.

2° Après quelques jours, l'équilibre s'établit entre les volumes entrant et sortant. Le niveau moyen dans la mer et le lac est identique; mais l'amplitude de la marée est moins forte dans le lac, de sorte qu'à haute mer les profondeurs primitives ont diminué.

3° L'heure de la pleine mer dans le lac est en retard sur celle de la mer.

4° La durée du jusant dans le lac est supérieure à celle du flot.

Ces phénomènes, qui proviennent des mêmes causes que ceux sur lesquels est basé le médimarémètre, dépendent évidemment, pour une même amplitude de marée, des dimensions du canal et, pour une longueur donnée, de la section seule. Si elle est très réduite, la marée n'atteindra même pas le lac; si elle est suffisante, l'amplitude de la marée diminue à peine.

La durée du flot et celle du jusant, dans ce dernier cas, tendront aussi à s'égaliser; mais la dernière restera plus grande si la communication entre les deux bassins n'est pas absolument libre. C'est ce que l'on observe dans les baies à large goulet comme celle de Brest et même dans les mers comme la Manche qui sont de véritables bassins latéraux par rapport à l'Océan et où la marée se comporte presque comme dans un canal ou dans un fleuve.

Les phénomènes que nous venons d'analyser se constatent aisément au canal de Suez. A Port-Saïd, l'amplitude de la marée est de 20 à 30 centimètres; elle atteint 1,50 *m* à Suez. Sur le parcours du canal se rencontrent deux bassins : le lac Timsah, au kilomètre 80, dont la superficie est de 2 000 hectares, et les lacs Amers, au kilomètre 100, qui comptent 30 000 hectares. Entre la Méditerranée et le lac Timsah, la surface est presque immuable et les vitesses sont au plus de 30 centimètres par seconde. Dans les lacs Amers, le niveau ne varie que de quelques centimètres, oscillant régulièrement autour du niveau moyen de Suez, et la vitesse atteint un mètre par seconde sur le tronçon de 50 kilomètres qui sépare ces grands lacs de la Mer Rouge.

Il existe quelques exemples de bassins intérieurs reliés à la mer par des canaux à section insuffisante pour la libre propagation de la marée. Le lac du Bras d'Or (Saint-Laurent) communique avec l'Océan par un canal de 2 à 300 mètres de largeur; le niveau y change à peine, bien que la marée, dont l'amplitude est de 90 centimètres à la mer, y pro-

duise dans le chenal des courants de 2,50 *m* par seconde. Ce courant *sort* pendant presque toute la durée du *flux*, et *entre* pendant la majeure partie du *jusant*.

Le phénomène est très accentué dans l'estuaire Aau (canaux du sud du Chili), dont la superficie est de trois mille hectares, et qui communique avec la mer par une étroite bouche. La direction des courants à l'entrée change à peu près à la mi-marée et leur vitesse est considérable.

Dans les bassins intérieurs qui se trouvent dans ces conditions, le niveau de pleine mer est donc inférieur et celui de basse mer supérieur aux mêmes niveaux en mer libre.

CHAPITRE V

MARÉES DANS LES FLEUVES.

Lorsque, le long d'une côte, la marée arrive à l'ouvert d'un canal à sec, les eaux s'y répandent à mesure de leur ascension et y déterminent un courant qui dure jusqu'à la pleine mer, pour redescendre ensuite avec le jusant. Dans un faible cours d'eau, les choses se passent de même, à peine modifiées par le débit propre de la rivière.

Mais si l'onde-marée rencontre un fleuve assez profond pour qu'elle puisse s'y propager en conservant son caractère, elle s'y développe en gardant sa crête à peu près au niveau de la pleine mer à l'embouchure. L'amplitude diminue donc à mesure du relèvement de la surface du fleuve, et la marée s'arrête à l'intersection de cette surface et du plan horizontal tangent à la crête de l'onde. Le lieu géométrique des hauteurs de la pleine mer dans le fleuve est ce plan horizontal.

On désigne sous le nom de partie maritime la portion du cours d'eau où se fait sentir la marée. Dans les fleuves de France et d'Angleterre, sa longueur ne dépasse guère 150 kilomètres et la marée ne s'y propage que pendant moins de six heures. Il en résulte que lorsque la pleine mer a lieu à la limite d'amont, la basse mer est proche à l'embouchure; il n'y a donc jamais deux ondes simultanées dans ces cours d'eau.

Sur les fleuves allemands, l'Elbe et le Weser, il arrive parfois que se dessine une deuxième onde, bien que la longueur de la partie maritime soit inférieure à celle des fleuves français et de l'Escaut.

Il est un cours d'eau où la marée remonte jusqu'à plus de 1 500 kilomètres de l'embouchure, grâce à ses grands fonds et à sa faible pente, c'est l'Amazone. La Condamine y avait reconnu la coexistence de plusieurs ondes-marées; d'après sir John Herschell le nombre s'en élèverait à huit, dont cinq présenteraient, au voisinage des syzygies, les caractères d'un mascaret de 4 mètres de hauteur. Nous n'avons pu avoir du Brésil aucun renseignement à ce sujet.

La marée continuant à se propager dans les fleuves après la baisse de l'eau à l'embouchure, son caractère ondulatoire est donc nettement établi; mais là, à peu près, s'arrête la ressemblance avec le phénomène tel qu'il se manifeste dans l'Océan. Le régime intérieur du cours d'eau s'établit comme si l'on élevait à l'embouchure progressivement jusqu'à la hauteur de pleine mer un mur qui se déplacerait ensuite vers l'amont avec le sommet de l'onde.

Sens du courant. — La pente de la rivière diminue à mesure que la hauteur du barrage augmente. Soient (fig. 19) B N le niveau du cours d'eau en mer basse, et AD le mur; quand le niveau aura passé de B

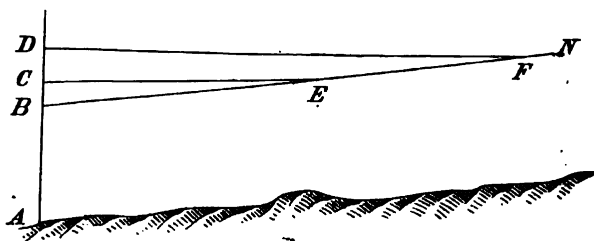


Fig. 19. — Marée dans un fleuve.

en C, la surface sera devenue C E; quand il sera monté en D, la surface sera D F...; aux points E, F... le niveau s'élèvera donc successivement et avec une grande rapidité. En dehors même de la propagation des ondes, la montée des eaux en amont s'expliquerait par les lois ordinaires de l'écoulement des liquides.

Si le débit du fleuve est considérable par rapport à l'amplitude de la marée, l'eau douce suffit à remplir les prismes BCE, CDFE... et l'écoulement simplement ralenti continue toujours de l'amont vers l'aval, bien que l'onde-marée se propage en sens inverse. C'est ce qui se passe sur l'Amazone, le Mississipi, le Saint-Laurent et sur beaucoup d'autres fleuves.

Si, au contraire, le débit propre ne suffit pas, les points C, D... s'élèvent plus rapidement que E, F... ; les droites C E, D F... s'inclinent vers l'amont, l'eau de la mer se déverse dans le fleuve et le courant se renverse. Ainsi se passent les choses sur les cours d'eau européens qui se jettent dans les mers à grandes marées. Dans la Tamise, par exemple, où l'eau introduite par le flot est 750 fois plus considérable que le débit propre du fleuve pendant ce temps.

Dans un même fleuve, le remplissage des prismes de marée dépend

de deux facteurs : l'un, ordinairement constant, le débit propre, l'autre variable, l'amplitude de l'onde. Suivant celle-ci, le débit d'eau douce peut donc être plus ou moins grand que le volume des prismes à remplir dans un temps donné, et le renversement du courant n'avoir lieu que dans les marées voisines des syzygies.

D'autre part, l'amplitude de l'onde diminue en général en raison de son éloignement de l'embouchure; il arrive, en tout état de cause, un point où le débit propre est prépondérant et où le renversement s'arrête. Ce point varie chaque jour avec le coefficient de la marée; l'extrême limite est atteinte dans les marées exceptionnelles des syzygies équinoxales, favorisées par le vent et la pression atmosphérique.

Le débit s'accroît encore pendant les crues; alors l'eau douce remplit aisément les prismes de marée et le renversement n'a pas lieu.

La quantité d'eau de mer qui pénètre dans le fleuve est donc variable; elle se mélange à l'eau douce; la salure diminue vers l'amont et cesse beaucoup au-dessous de la limite de la partie maritime. Un calcul très simple permet, étant données les conditions particulières de la marée et du fleuve, de déterminer le volume d'eau introduite par le flot. Cette quantité a la plus grande influence sur l'entretien des profondeurs du lit.

Courbe des marées fluviales. — A l'embouchure, la courbe des marées est celle de la mer elle-même; elle est nulle à la limite d'amont du lit maritime. Près de cette limite, le prisme de marée est petit, il est rapidement rempli par l'eau douce. Or, l'exhaussement du niveau n'a lieu que pendant le remplissage, le flot ne dure donc que peu d'instants; le jusant commence bientôt et se prolonge très longtemps. La branche ascendante est très courte et brusque, tandis que la descendante est longue et aplatie; la première est convexe, l'autre concave.

Entre la limite supérieure du lit maritime et l'embouchure, les courbes se transforment, la branche du flot augmentant peu à peu, tandis que l'autre diminue, celle-ci restant pourtant toujours plus longue.

Il faut remarquer que si l'on place à côté les unes des autres les courbes de marée de différents points du fleuve, les maxima seront à peu près sur une même horizontale, tandis que les minima vont en s'abaissant d'amont en aval. Le lieu géométrique des basses mers est ainsi une surface plus ou moins parallèle au lit du fleuve, abstraction faite des irrégularités accidentelles.

On appelle profil instantané d'une rivière (fig. 20) la courbe dont les

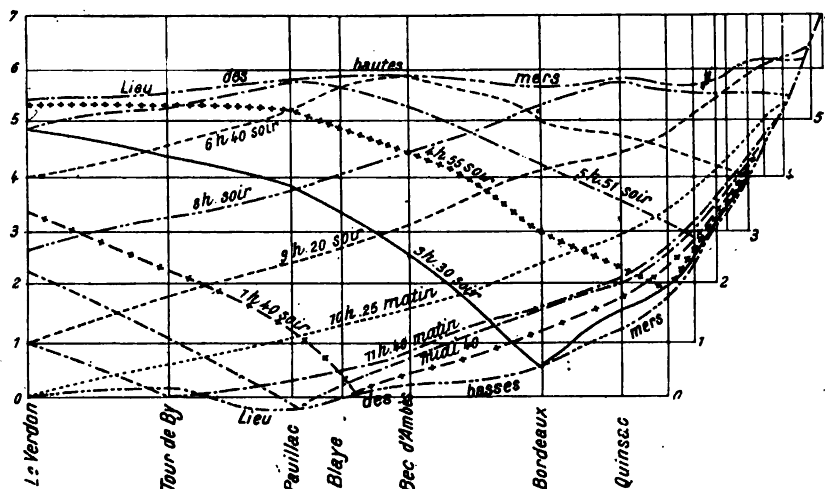


Fig. 20.
Profil instantané d'une marée dans la Garonne-Gironde.

abscisses sont les distances des divers points du fleuve et les ordonnées les hauteurs de la marée en un même moment.

Courants. — Les courants occasionnés par la marée dans les fleuves sont très variables suivant le débit propre, l'amplitude de la marée, la distance du point considéré à l'embouchure, etc. Dans les portions du fleuve où le courant se renverse, le courant de flot ne s'établit pas au moment où l'eau commence à monter, mais avec un retard plus ou moins long. La vitesse de ce courant est d'abord très faible ; elle devrait être maxima à la mi-marée, puisque c'est à ce moment que la mer monte le plus vite, mais cela ne se présente pas toujours, puisque parfois même le contre-courant n'est alors pas encore établi. Enfin la vitesse devient très faible à la pleine mer; elle s'annule, puis le courant de jusant commence après une étale qui s'élève parfois à 20 minutes. La vitesse devient maxima à mi-hauteur et continue en se ralentissant jusqu'au renversement.

Les vitesses durant le jusant sont d'ordinaire plus considérables que pendant le flot.

Durée de la marée. — Le temps qui s'écoule entre deux pleines mers, en un même point du fleuve, est en Europe de 12,25 h comme

dans les océans ; mais il n'en est pas de même dans les pays où l'amplitude des marées diurne et nocturne est inégale. Ainsi dans la rivière Valdivia, où la différence de hauteur de deux marées consécutives aux syzygies est de 60 *cm*, la marée de jour ne dure que 11 heures 45 minutes et celle de nuit atteint 13 heures 5 minutes.

Cet effet est dû à deux causes : d'abord il entre plus d'eau salée dans le fleuve pendant la marée nocturne et l'écoulement doit en être plus long ; mais c'est surtout parce que l'amplitude de cette marée étant plus forte, son ascension rapide arrête la vidange de la marée précédente et fait gonfler le fleuve.

Position relative des niveaux de haute et basse mer. — On a dit que le lieu géométrique des hautes mers est en théorie un plan horizontal ; il est donc plus élevé en vive eau qu'en morte eau. En pleine mer, dans les pays à marée régulière, l'amplitude est divisée presque également par le niveau moyen, de sorte que le niveau des basses mers descend plus en vive eau qu'en morte eau. Il en est de même dans la portion d'aval du lit maritime des fleuves dont le régime est très analogue à celui de la mer ; mais dans la partie d'amont, en général, le lieu des basses mers est plus élevé pour les marées de vive eau que pour celles de morte eau. C'est que dans les premières le flot introduit un volume plus considérable d'eau, qui n'a pas le temps de s'écouler durant le jusant.

L'intersection des lieux géométriques des basses mers de vive et morte eau se trouve à 24 kilom. de l'embouchure sur l'Adour, à 105 kilom. sur la Garonne, à 36 kilom. sur la Charente, à 27 kilom. sur la Loire, à 37 kilom. sur la Seine, entre Quillebeuf et Villequier. La portion d'aval varie donc du quart aux deux tiers de la longueur du lit maritime.

Caractères du flot. — A mesure que l'onde-marée remonte un fleuve, la distance entre sa tête et son sommet diminue ; autrement dit la vitesse du sommet est plus grande que celle de la tête, sans doute parce que celle-ci se propage dans une eau moins profonde.

Dans les fleuves à renversement de courant, on observe des différences tranchées dans les caractères du flot, suivant qu'on le considère au moment où il commence ou lorsqu'il est franchement établi. On sait que dans les rivières la vitesse est plus grande à la surface qu'au fond

et contre les rives concaves que contre les rives convexes. De même le courant de jusant et celui du flot établi suivent le régime ordinaire des cours d'eau.

Il en est tout autrement du *premier flot*; il commence par fuir les rives concaves et se propage d'abord contre les portions convexes, et sa vitesse est plus grande au fond qu'à la surface. On a proposé de nombreuses explications de cette double anomalie, qui paraît due à l'existence même des forces en jeu. Le premier flot a à lutter contre le courant de jusant, qui a son maximum aux courbes concaves et à la surface ; il semble naturel que le courant de flot arrive plus rapidement à se propager là où la vitesse contraire est minima. Quand il est bien établi, son intensité a facilement raison des obstacles et il se comporte comme les courants ordinaires.

Le courant de jusant commence d'abord dans le fond pour les mêmes raisons.

Pendant un certain temps, il y a donc, au commencement du flot et du jusant, des contre-courants à la surface et dans le fond.

Anomalies. — Le lieu géométrique des hautes mers n'est un plan horizontal qu'approximativement ; en réalité, sa section par un plan vertical représente une succession de lignes courbes ou droites dont les unes sont inclinées en amont, les autres en aval. La direction des courants n'en est pas changée, mais seulement leur vitesse aux divers points.

On a observé cette anomalie en France sur la Seine, la Loire, la Charente, etc. Sur la Loire, elle s'est produite dans une partie approfondie par des travaux d'endiguement. Elle se manifeste en Angleterre sur le Forth. Il est probable qu'elle a pour cause des variations dans la largeur ou la profondeur de la rivière, la présence de hauts-fonds, etc.; mais les renseignements précis manquent à ce sujet.

On observe un phénomène analogue pour les lieux des basses mers ; il arrive que le point le plus bas n'est pas à l'embouchure, mais à une certaine distance en amont (Seine, Loire, Garonne, Charente, divers fleuves anglais). On n'a pas encore donné de ce fait, qui semble contraire aux lois de l'écoulement des liquides, une explication admissible.

On retrouve dans les fleuves les caractères exceptionnels des marées des mers adjacentes. Ainsi dans la Seine on constate les deux ondes produites par le cap de Barfleur.

De même dans les fleuves à estuaire en entonnoir, l'amplitude augmente d'aval en amont, comme dans la baie de Fundy. A Bordeaux elle dépasse de 2 mètres celle constatée à Royan.

La marée la plus remarquable de l'Europe est celle de la Severn, en Angleterre. A Avonmouth, près de Bristol, en marée de vive eau de syzygie équinoxiale, la montée totale atteint 13,35 *m* ; le flot dure 5 heures 9 minutes et le jusant 7 heures 42 minutes ; le maximum de la montée comme de la baisse a lieu pendant la deuxième heure avant et après la pleine mer ; le premier s'élève de 3,77 *m* en une heure, ce qui donne un millimètre par seconde ; le second de 2,82 *m* à l'heure ou $\frac{8}{10}$ de millimètre par seconde.

Les marées de morte eau n'atteignent que 5,35 *m*, ce qui fait une différence de 8 mètres entre les plus hautes et les plus faibles amplitudes.

A l'entrée du canal de Bristol, l'amplitude en vive eau n'est que de 5,50 *m*. Le maximum n'est d'ailleurs pas à Avonmouth, mais à Chepstow, sur un petit cours d'eau, la Wye, où elle atteint 15 mètres ; elle gagne donc 9,50 *m* de hauteur en se resserrant dans l'estuaire.

Ce phénomène s'observe même dans des fleuves à largeur uniforme ; ainsi dans le Rio Imperial du Chili, l'amplitude est plus grande à Carahue, à 35 kilom. en amont, qu'à l'embouchure. Il est difficile alors d'imaginer la cause de cet accroissement de hauteur.

Marche d'une molécule dans un fleuve à marée. — Dans un fleuve sans marée, une molécule d'eau descend toujours vers la mer et l'atteint après un temps qui dépend de la vitesse de chaque section du cours d'eau. Il n'en est pas de même dans une rivière à marée. La molécule descend à l'ebbe pendant un certain temps, dont la durée est proportionnelle à la distance de l'océan. A la limite supérieure de la partie maritime, le jusant est presque constant, tandis qu'il ne dure que 6 heures 1/4 à l'embouchure ; on peut donc compter que la molécule descend pendant 9 heures 20 minutes ou 33 600 secondes. Avec une vitesse moyenne d'un mètre, elle parcourt donc 33 kilom. A ce moment elle sera reprise par le flot, qui la ramènera en amont pendant 3 heures 5 minutes, et ainsi de suite ; on peut apprécier approximativement le nombre de marées pendant lesquelles elle oscillera.

L'amélioration du lit d'une rivière entraîne la facilité de la circulation du flot et du jusant et par conséquent l'accroissement de vitesse

des molécules. Sur la Clyde, en 1858, un flotteur jeté à l'eau à Glasgow mettait 43 marées à atteindre Port-Glasgow à 33 kilom.; en 1881, au bout de 7 marées, il descendait au-dessous de Greenock, à une distance de 38 kilom.

Mascaret. — Dans les estuaires de certains fleuves, la propagation du flot est contrariée par diverses causes et il en résulte un phénomène appelé *barre* ou *mascaret* en France, *pororoca* sur l'Amazone et *bore* ou *œger* en Angleterre, ce dernier nom dérivant peut-être de celui du dieu fluvial Ægir, devenu célèbre en ces dernières années. C'est une lame énorme, oblique ou concave en amont, qui se précipite dans le lit du fleuve, avec une vitesse et un bruit considérables.

Cette barre liquide se produit au premier moment du flot, c'est-à-dire qu'avant sa manifestation le courant de jusant est encore rapide. Lorsqu'elle a passé, le niveau s'abaisse un peu, mais le courant de flot est établi et le fleuve se remplit.

Sur la Seine, le mascaret se forme à Villequier; il atteint son maximum (plus de 2 mètres de hauteur au-dessus du niveau du fleuve) à Caudebec, puis diminue et disparaît en aval de Rouen. Le flot qui le suit mesure 1 mètre de moins en hauteur; la vitesse de la lame atteint 8 mètres par seconde (16 nœuds).

Brémontier et Babinet ont les premiers donné du mascaret l'explication adoptée aujourd'hui.

On peut admettre que l'élévation de la marée, au lieu d'être continue, se fait brusquement par tranches successives [1]. Chacune de ces arrivées brusques de liquide détermine une onde de translation qui remonte le courant avec une vitesse que nous savons être

$$v = \sqrt{g\,(H + h)} - U.$$

Admettant h, la hauteur d'une tranche, comme constante, H est égal à la profondeur primitive augmentée successivement de h, $2h$, $3h$... et U va en diminuant pour deux raisons; la première, c'est qu'à chaque exhaussement la section s'augmente en hauteur de h, $2h$... et que le débit du fleuve étant constant, sa vitesse diminue; la seconde, c'est que

(1) C'est bien ainsi, d'ailleurs, que se propage la marée. Nous l'avons constaté par un appareil enregistreur où le crayon se trouvait à l'extrémité d'un bras de levier amplifiant de dix fois les mouvements du flotteur. La courbe obtenue dénotait l'existence de pulsations successives.

ces relèvements successifs en aval rendent la pente superficielle de plus en plus faible.

Le terme $\sqrt{g\,(H+h)}$ où h va en s'accroissant, augmente, tandis que U diminue, donc la célérité v de la propagation de l'onde va en s'accélérant.

En supposant avec M. Bazin

$$U = 1\,m \qquad H = 2\,m \qquad \text{et} \qquad h = 20\,cm \text{ toutes les 5 minutes,}$$

on trouve que U devient successivement 58 *cm* puis 17 *cm* et est enfin négligeable après la troisième onde, tandis que v prend les valeurs

$$3{,}64\,m \qquad 4{,}27\,m \qquad 4{,}88\,m$$

En appelant x la distance à laquelle se rencontreront les deux premières ondes, on trouve $x = 7\,400$. Ainsi la rencontre aura lieu à 7 400 mètres de l'embouchure, 29 minutes après le départ de la première onde. A ce moment, la troisième vague sera à moins de 400 mètres en arrière et rejoindra bientôt les deux autres. La tête du flot aura alors une hauteur de 2,60 *m* avec une vitesse donnée par la formule

$$\sqrt{g \times 2{,}60} = 4{,}85\,m$$

Le mascaret sera établi.

L'explication est des plus plausibles ; mais il se produit des phénomènes accessoires et des anomalies que la théorie est impuissante à expliquer.

M. Comoy pense que la cause immédiate du mascaret est bien l'accumulation d'une suite d'ondes élémentaires de la marée fluviale sur l'onde de la tête de flot qui devient alors saillante sur les basses eaux du fleuve. Mais, d'après lui, une autre cause a dû produire un effet préalable, qui consiste dans le gonflement de la surface de l'eau dans le fleuve, gonflement qui se produit quand l'onde fluviale s'élève plus vite que la marée ne monte à l'embouchure. C'est ce gonflement, encore inexpliqué, qui favorise la réunion des ondes élémentaires avec celle de la tête de flot, par suite de la plus grande vitesse qu'il leur permet de prendre.

Il est certain que le mascaret est influencé par la forme de l'embouchure, en entonnoir dans les fleuves où il se produit, par la position, l'étendue, la hauteur des bas-fonds qui assèchent en partie à basse mer, par la vitesse du cours d'eau, par le régime des marées, mais on ignore le mécanisme de ces actions.

Le mascaret est modifié par le changement des profondeurs du lit, bien que cette lame soit assez superficielle pour n'avoir d'action qu'au-dessus des basses eaux. Dans la Seine on avait espéré le voir diminuer par suite des travaux accomplis pour la régularisation du lit. Il en fut d'abord ainsi, mais la période de calme n'a pas duré ; le phénomène a recommencé, sans doute à cause de modifications survenues dans la position des bancs de l'embouchure, mais il n'est plus autant à redouter, car il se manifeste dans un lit devenu plus profond.

Le rouleau liquide qui constitue le mascaret est d'ordinaire accompagné d'ondulations secondaires appelées *éteules*, au nombre de 4 à 15, hautes de 1 mètre à 1,50 *m* et qui sont peut-être la partie la plus dangereuse.

On observe encore le mascaret en France sur la Dordogne, la Charente, la Vilaine et parfois sur la Garonne.

D'après M. Comoy, les caractères des fleuves où se produit le mascaret sont les suivants :

1° Le mascaret se forme, pendant les grandes marées, sur les fleuves dont une barre obstrue l'embouchure. La réciproque n'est pas vraie.

2° La hauteur du mascaret des fleuves de cette espèce est plus grande quand le sommet de la barre s'élève au-dessus du niveau des plus basses mers que lorsqu'il reste au-dessous de ce niveau.

3° Le mascaret ne se manifeste d'ordinaire pas sur les fleuves dont la barre est située dans la mer, au large de l'embouchure.

4° Cependant le mascaret se produit quelquefois sur les fleuves de cette espèce. Alors, il prend toujours naissance en des lieux où le lit du fleuve présente une notable diminution, soit dans la largeur, soit dans la profondeur.

Le mascaret se rencontre sur divers fleuves d'Angleterre. Sur la Severn, il atteint parfois une hauteur de 2,40 *m* avec une vitesse de 3,50 *m* par seconde. Sur le Trent, il s'élève à 1,80 *m* et sur le Solway Firth à 1,20 *m* avec une vitesse de 5 mètres à la seconde. Il y avait un mascaret de 30 *cm* de hauteur sur le Witham ; il a disparu quand on y a pratiqué un chenal profond. Le premier flot arrive maintenant avec une avance d'une heure.

Le mascaret se faisait autrefois sentir sur l'Ems en Allemagne, mais a disparu à la suite de travaux de régularisation du lit.

En Chine, sur le Tsien-tang-Kiang, la marée monte en dehors du golfe de Hang-Chan de 3,60 *m*; mais, en avançant dans le golfe, elle s'élève

à 7,60 *m* et même à 10 mètres quand le vent souffle en côte. Le mascaret se manifeste sur le fleuve avec une vitesse de 7 mètres à la seconde ; sa longueur est de 1 600 mètres et son front est une blanche cascade de 3,50 *m* de hauteur. On en entend le bruit à plusieurs lieues. Il s'avance ainsi sur une longueur de 25 kilom. et se fait encore sentir sur une longueur égale, mais très atténué.

On connaît aussi le mascaret sur l'Orénoque, le golfe de Fundy, sur le Chat-el-Arab, sur l'Hoogly, où la vague se propage avec une vitesse de 8,50 *m* par seconde et une hauteur de 1,50 *m*. Dans l'Amazone, où la marée remonte jusqu'à 1 600 kilom. de l'embouchure et où sur cette immense étendue existent à la fois jusqu'à 8 ondes-marées, on observe, dit-on, aux équinoxes, pendant trois jours, des mascarets de plus de 4 mètres de hauteur.

CHAPITRE VI

LES VAGUES

La surface de la mer n'est presque jamais unie. L'eau éprouve des mouvements divers, qui se manifestent sous la forme d'ondulations.

Vagues des tremblements de terre. — Lors de l'éruption du Krakatoa, dans l'île de Java, le 27 août 1883, les ondes soulevées se propagèrent au loin sur les côtes de l'Asie, de l'Afrique, de l'Amérique ; le marégraphe de Rochefort enregistra leurs manifestations ultimes. A l'île de la Réunion, au port de Saint-Pierre, les ondes pénétraient avec une vitesse de plus de 5 mètres à la seconde et occasionnaient des dénivellations supérieures à 1,50 *m*, tandis qu'au large la mer paraissait calme, les vagues n'étant pas visibles à cause de leur faible hauteur en comparaison de leur longueur. Ce phénomène s'est produit 5 heures et demie après l'éruption.

A Algoa Bay, au sud de l'Afrique, M. Shield a constaté la même hauteur d'un mètre et demi ; la vitesse de propagation était de 180 mètres par seconde et la période moyenne de 70 minutes. La longueur de l'onde était donc de 750 kilomètres environ. Sur d'autres points, on a trouvé une vitesse de propagation double de celle observée à Algoa.

A Simoda, près de Tökyo au Japon, Maury raconte que l'effet d'un tremblement de terre abaissa l'eau du port de 6 mètres. Peu d'heures après, les marégraphes de San Francisco et de San Diego accusèrent l'arrivée de plusieurs vagues extraordinaires sur la côte de Californie. Sans doute, c'étaient les mêmes qui avaient détruit la ville de Simoda, mais on ne sut pas leur origine. En supposant qu'elles venaient du Japon, elles auraient eu une vitesse de propagation, ou célérité, de 400 mètres par seconde. Leur longueur était de 340 kilomètres.

Les ondes produites par les tremblements de terre sont des ondes de translation ; la masse des eaux est remuée dans toute la profondeur.

On s'en rend compte en remarquant que malgré leur faible hauteur et comme l'onde marée elles pénètrent dans les ports les plus abrités, où aucune vague, si violente qu'elle soit, ne se fait sentir.

Lame de tempête. — D'après Piddington, c'est une masse d'eau s'élevant au-dessus du niveau ordinaire de l'Océan par la diminution de la pression atmosphérique et peut-être aussi par d'autres causes. Elle est entraînée par la tempête ou marche devant elle ; quand elle atteint les baies ou les estuaires, elle se resserre, s'élève et cause de terribles inondations.

VAGUES PRODUITES PAR LE VENT

Les vagues ordinaires sont produites par le vent. Sous la pression de l'air en mouvement, l'eau commence par se soulever en légers renflements isolés, qui peu à peu s'accroissent, se rejoignent et deviennent des rouleaux dont la hauteur continue à s'augmenter sous l'action constante du souffle aérien.

Les vagues sont alors constituées en longs bourrelets qui se suivent à des intervalles presque identiques. Deux lames sont séparées par un *creux* ; on appelle *crête* ou *sommet* la ligne plus ou moins horizontale qui forme leur sommet. Le rouleau se trouve partie en dessus, partie en dessous de la surface d'équilibre de la mer.

La distance verticale entre la crête et le creux mesure la *hauteur* de la lame. Elle n'est pas partagée en parties égales par le niveau moyen de l'eau tranquille. Dans les vagues de peu de hauteur, la partie au-dessus du niveau moyen est égale aux 3/4 de la hauteur totale en moyenne. Avec du vent, cette proportion est encore plus forte ; elle varie de 0,70 à 0,80. La *longueur* est donnée par la hauteur de deux crêtes successives.

Genèse des vagues. — La théorie des vagues a fait en Angleterre le sujet d'observations et d'expériences de Robertson et Scott Russell ; elles ont été analysées par Airy dans un travail magistral. En Allemagne, les frères Weber ont apporté également d'importants matériaux à leur étude. En France, MM. Bertin, Boussinesq, de Bénazé en ont donné une théorie analytique complète. Mais, dès 1804, l'Autrichien Gerstner avait élucidé la question dans un mémoire dont M. de Saint-Venant a publié la traduction dans les *Annales des Ponts et chaus-*

sées de janvier 1887. Nous résumons sa théorie, à peine modifiée par les recherches postérieures.

Dans la propagation des ondes il y a, presque sans déplacement, ascension et descente successives des molécules d'eau. Newton avait comparé ce mouvement, qu'il estimait purement vertical, à celui d'un liquide en oscillation dans un siphon renversé, d'où le nom de théorie du siphonnement; mais il est aisé d'en démontrer l'insuffisance et elle a été abandonnée pour la théorie du mouvement orbitaire, émise par Emy après Gerstner.

Bien que le mouvement de la vague ne soit qu'apparent, cette apparence ne se manifeste pas moins sous la forme d'un déplacement d'eau au-dessus et au-dessous de la surface. Pour produire le gonflement du sommet, les molécules supérieures doivent se précipiter les unes vers les autres, tandis que le creux résulte de l'éloignement des particules inférieures; ce double transport exige donc aussi bien une translation horizontale qu'un mouvement vertical.

Ce point de départ établi, l'analyse démontre que la combinaison des deux déplacements détermine pour chaque molécule le parcours d'une orbite, circulaire si la profondeur est grande, elliptique dans le cas contraire. Cette orbite est contenue dans un plan vertical parallèle à la direction des lames.

Aimé a d'ailleurs constaté le mouvement orbitaire des molécules au moyen d'un appareil simple. Il se compose d'un récipient conique en fer-blanc, porté sur une planchette lestée qu'il descendait au fond de la mer (fig. 21). L'extrémité supérieure du cône est percée de deux trous, un pour permettre la sortie goutte par goutte d'huile colorée contenue dans le vase, l'autre pour la rentrée de l'air. L'appareil a été immergé dans le port d'Alger jusqu'à une profondeur de 10 mètres: les gouttes d'huile en montant dans l'eau décrivaient une courbe analogue à une sinusoïde, l'écartement horizontal allant jusqu'à 1 mètre.

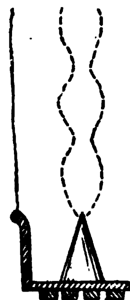


Fig. 21.
Expérience d'Aimé

Une autre expérience d'Aimé dont il sera question plus loin démontre aussi le mouvement orbitaire des molécules.

On appelle *période* le temps qu'une molécule emploie à parcourir son orbite; après ce trajet, la particule se retrouve à sa position d'origine, c'est-à-dire que si elle était au sommet d'une vague, elle sera au sommet de la lame suivante. Le parcours de l'orbite et le déplacement

de la vague d'une longueur égale à la sienne s'accomplissent donc durant la même période.

Toutes les molécules d'une vague, à quelque profondeur ou à quelque distance qu'elles soient situées, ont la même période.

Il est facile dès lors de se rendre compte du mode de formation d'une onde. Supposons, pour simplifier, qu'elle ait la forme d'une cycloïde, engendrée par un cercle dont la circonférence est égale à la longueur de la vague ; la hauteur de celle-ci sera par conséquent égale au diamètre du cercle générateur.

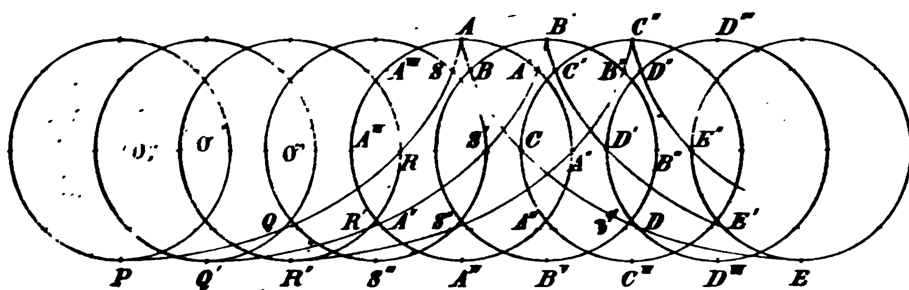


Fig. 22. — Génération de la vague.

Soit PQRSABCDE (fig. 22) une vague complète. Partageons en un même nombre de parties égales O O' O'' O''' O^{IV}..... sa longueur, et A A' A''..... et B B' B''..... les circonférences des cercles égaux décrits des points O O' O'' O''' O^{IV}..... comme centres avec un rayon égal à la hauteur de la vague.

Faisons tourner tous ces cercles en même temps d'une division vers la droite. Le point A ira en A', B en B', C en C'... S en S', R en R'... de sorte que les courbes PQRSABCDE semblent s'être transportées en R'S'A'B'C'D'E'F', etc.

Tournons encore d'une division, les courbes semblent de même s'être transportées en R'' S'' A''.....

Ce seront ces courbes qui limiteront successivement la forme de la vague. Celle-ci paraîtra donc marcher, tandis que chaque molécule n'aura fait que tourner dans son orbite.

Quand le point A, après avoir passé par A' A''..... A^{VII} sera revenu au sommet en A^{VIII} ou A, la lame sera en A^{VIII} B^{VIII}..... et une autre sera venue prendre la forme A B C..... Or la distance A A^{VIII} est justement la longueur de la vague.

Ainsi se comportent les molécules de la surface. A toute profondeur.

les molécules conservent leur position relative ; mais les courbes qu'elles décrivent ne sont pas semblables à celles de la surface.

Gerstner d'abord, puis Airy, MM. Bertin, Boussinesq ont établi que les profondeurs variant en progression arithmétique, les rayons des

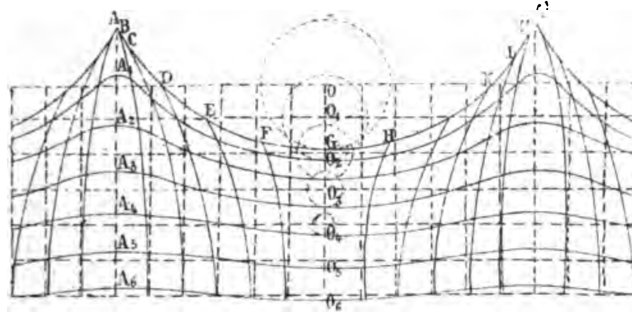


Fig. 23.

cercles générateurs varient en progression géométrique. Au-dessous du point O du cercle générateur de la courbe de surface, cercle dont le diamètre est $2a$, prenons par exemple les points $O_1 O_2 O_3$ tels que (fig. 23).

$$OO_1 = \frac{a}{2} \qquad OO_2 = a \qquad OO_3 = \frac{3a}{2} \qquad OO_4 = 2a...$$

Les rayons des cercles générateurs décrits des points $O_1 O_2 O_3$..... seront en une progression géométrique dont la raison est $\frac{1}{\sqrt{e}}$, e étant la base des logarithmes népériens.

Donc les rayons $a_1\, a_2\, a_3$..... seront

$$a_1 = \frac{a}{\sqrt{e}} = 0{,}6065a$$

$$a_2 = \frac{a}{e} = 0{,}3679a$$

$$a_3 = \frac{a}{e\sqrt{e}} = 0{,}2231a$$

$$a_4 = 0{,}1353a$$

. . . .

$$a_{10} = 0{,}0068a$$

Mais les longueurs de l'onde restent les mêmes à toute profondeur. Les courbes obtenues seront donc de plus en plus aplaties.

Les espaces AB, BC, CD....., A_1B_1, B_1C_1, C_1D_1..... sont parcourus dans les mêmes temps par les points AA_1A_2..... et ces points AA_1A_2....., qui se trouvaient d'abord sur la même verticale, seront après le même espace de temps en BB_1B_2....., CC_1C_2.....

On voit donc que les plus grands déplacements verticaux des particules ont lieu à la surface et que le mouvement dans les profondeurs devient sensiblement rectiligne et uniforme, c'est-à-dire que les molécules décrivent alternativement en avant et en arrière une droite horizontale.

Pour figurer la surface de l'eau, on a supposé la vitesse du mouvement horizontal des molécules égale à celle de leur mouvement circulaire. On a obtenu une cycloïde ordinaire avec ses points de rebroussement en haut. La circonférence du cercle générateur et la longueur de la vague sont donc égales, c'est-à-dire que la longueur est à la hauteur comme $\frac{\pi}{1}$. En réalité, les longueurs des vagues sont avec la hauteur dans un rapport beaucoup plus grand, de 10 à 40. Aussi la courbe de la surface est-elle plutôt une trochoïde.

Conséquences. — Les conséquences de cette théorie ne sont donc qu'approchées, mais sont néanmoins utiles. Les voici résumées :

1° Les vagues de même longueur sont décrites dans le même temps, quelle que soit leur hauteur.

2° La longueur du pendule isochrone aux vagues est à leur longueur comme $\frac{2}{\pi}$.

3° Les vitesses moyennes u des vagues sont proportionnelles aux racines carrées de leurs longueurs. Elles sont données par la formule

$$u = \sqrt{ga} = 3{,}132\,\sqrt{a}$$

la longueur observée de la vague étant représentée par $2\pi a$.

Ce résultat ne se vérifie guère en pratique ; on peut attribuer en partie les différences observées à l'influence des courants.

Formule de M. Gaillard. — Pour des vagues ayant au plus deux mètres de hauteur, se propageant dans de l'eau peu profonde, le lieutenant Gaillard, du corps des Ingénieurs des Etats-Unis, a trouvé la relation suivante entre la hauteur h de la vague et u sa vitesse par seconde, immédiatement avant le déferlement.

$$h = 0{,}08242\,u^{\frac{3}{2}}$$

h et *u* étant comptées en pieds. Cette formule, réduite en mètres, devient

$$h = 0{,}1515\, u^{\frac{3}{2}}$$

Elle s'accorde assez bien avec la formule $u = \sqrt{g\,a}$ pour les vagues dont la hauteur est le quinzième environ de leur longueur.

Relations diverses. — Soient

2 L la longueur d'une vague,
V sa vitesse de translation ou célérité,
v la vitesse moyenne orbitaire des molécules,
2 C la circonférence de l'orbite, on a

$$\frac{V}{v} = \frac{C}{L}$$

Pour l'eau peu profonde, d'après Rankine, la vitesse est presque indépendante de la longueur et égale à celle d'un corps tombant d'une hauteur à la moitié de la profondeur H, plus les 3/4 de la hauteur 2 *a* de la vague. Donc

$$V = \sqrt{gH} + \frac{3}{4}\,2a = \sqrt{gH} + \frac{3a}{2}$$

Si l'on appelle 2 T la durée de l'oscillation d'une vague, l'analyse établit entre les divers éléments les relations suivantes :

$$L = aT \qquad L = \frac{gT^2}{\pi} \qquad T = \frac{\pi a}{g} \qquad L = \frac{\pi a^2}{g}$$

$$v = \frac{\pi h}{T} = \frac{\pi a h}{L}$$

Marche des vagues. — Quand des vagues marchent vers la côte en rencontrant des profondeurs graduellement décroissantes, leurs périodes ne changent pas, c'est-à-dire qu'elles mettent le même temps à parcourir une distance égale à leur longueur ; mais le frottement des molécules contre le fond diminue leur vitesse et par suite leur longueur. La puissance des lames courtes devrait donc être moins grande que celle des lames longues de même période ; mais cette conclusion est très discutée. Les particules inférieures sont plus ralenties que celles de la surface et le sommet s'incline en avant sur le corps de la lame.

La forme de l'orbite parcourue par les molécules se modifie en conséquence ; la courbe elliptique ne se ferme plus et les particules de la

moitié supérieure, retournant en avant, dépassent le sommet de l'axe horizontal. Il en résulte un mouvement de transport réel, qui explique le fait bien connu que les lames *portent à terre*. Ce mouvement s'accélère à mesure que la profondeur diminue et devient très prononcé sur certaines côtes comme celles du Sénégal où longtemps l'on en a profité pour l'atterrissement des embarcations.

Déferlement. — Quand les lames arrivent au rivage, leur crête se déverse en avant et elles *déferlent*. Ce phénomène a lieu en général lorsque la profondeur H de l'eau est égale à la hauteur h des vagues. Mais il peut se manifester dans les fonds compris entre 0,70 h et 2 h. La lame brise d'autant plus loin qu'elle est poussée par le vent et que le talus de la plage est accore.

Pendant le déferlement, la lame perd sa forme pour prendre celle de l'estran, sur lequel elle est projetée par la transformation de son mouvement ondulatoire ; mais le frottement, la pesanteur l'arrêtent bientôt et elle redescend la pente, dont l'inclinaison est en raison directe de la violence des vagues.

Estran. — Quand la lame s'avance en déferlant, la crête renversée a donc une direction de haut en bas qui affouille l'estran ; si celui-ci est sablonneux, le sable est remué et devient *vif*, selon l'expression consacrée ; il se tasse ensuite par le frottement de l'eau descendante.

Si un obstacle, placé sur un estran sablonneux est trop lourd pour être remué par la lame, celle-ci l'enterre ou au contraire accumule sur lui le sable, de manière à égaliser la surface de la plage.

Hauteur des vagues. — Influence du vent. — La hauteur des vagues varie avec plusieurs éléments et surtout avec l'intensité du vent. On a cherché à établir entre ces quantités une relation mathématique, et divers auteurs avaient cru devoir estimer la hauteur au quart de la vitesse W du courant aérien qui la produit. L'amiral Coupvent des Bois fait remarquer que la hauteur ne dépend pas seulement de la force, mais aussi de la direction du vent à la surface de la mer.

Cependant, de l'analyse de ses nombreuses observations, il conclut qu'en terme moyen une vague de deux mètres de hauteur répond à une vitesse de vent de cinq mètres par seconde. Alors, « dans l'hypothèse où le carré de la vitesse des vents serait proportionnel aux cubes de

la hauteur des vagues », il a établi, pour le cas où aucune circonstance particulière ne vient influer sur les résultats, la formule

$$2h = 0,75\ W^{\frac{2}{3}}$$

L'auteur cite lui-même beaucoup d'exceptions aux nombres donnés par cette formule. Il serait d'ailleurs impossible d'en obtenir une exacte, car la hauteur des vagues dépend également de la durée du vent, de la persistance de la direction et d'autres circonstances encore.

En une même localité, Algoa Bay, M. Shield a observé des hauteurs de vagues de 3 mètres, 4 mètres, 6,30 *m*, pour des vitesses correspondantes du vent de 29 mètres, 34 mètres, 30 mètres.

Fetch. — Pour une vitesse et une direction de vent données, la persistance de l'action du courant aérien est un facteur très important. Or, cette durée dépend de la longueur du trajet que peut parcourir une lame. Comme au maximum ce trajet ne peut être que l'espace compris depuis la terre la plus voisine de son point de départ, cette distance que les Anglais nomment le *fetch* est un élément prépondérant de la hauteur possible.

Dans les mers étroites comme la Méditerranée, les vagues ont au plus, en général, de 3 à 4 mètres de hauteur, bien que Smyth en ait signalé de 9 mètres. Dans l'Océan Atlantique, la hauteur moyenne des vagues de tempête est de 6 mètres ; Scoresby en a mesuré de 13 mètres. Mais dans l'Océan Atlantique, qui n'est borné que par les terres lointaines du Pôle Sud, Dumont d'Urville et Fleuriot de Langle affirment en avoir rencontré de 30 mètres de hauteur, ce qui semble exagéré.

Formule de Stevenson. — M. Th. Stevenson donne, pour mesurer la hauteur maxima des vagues d'ouragan dans l'eau profonde, la formule

$$h = 1,5\sqrt{d}$$

dans laquelle h est la hauteur en pieds et d la longueur du *fetch* en milles.

En conservant pour d la mesure par milles, qui est la plus commode à trouver sur les cartes, on a pour h en mètres

$$h = 0,467\sqrt{d}$$

ou approximativement

$$h = \frac{\sqrt{d}}{2}$$

Pour les courtes distances de 1 à 5 milles, comme dans les lacs, bras de mer, l'auteur donne la formule modifiée

$$h = 1{,}5 \sqrt{d} + 2{,}5 - \sqrt[4]{d}$$

qui pour h en mètres devient

$$h = 0{,}457 \sqrt{d} - 0{,}304 \sqrt[4]{d} + 0{,}76$$

M. Hawksley a donné aussi la formule suivante :

$$h = \frac{\sqrt{d}}{40}$$

dans laquelle h et d sont exprimés en yards. En mètres et milles comme pour la formule de Stevenson, elle devient :

$$H = 1{,}03 \sqrt{d}$$

Elle donne en général des hauteurs trop grandes ; il y aurait sans doute lieu d'augmenter le dénominateur

Voici quelques résultats de la formule de Stevenson :

Fetch en milles	Hauteur en mètres	Fetch en milles	Hauteur en mètres
1	0,91	150	5,60
10	1,45	200	6,46
50	3,28	300	7,90
100	4,57		

Il est évident que pour de grandes distances les résultats seraient inacceptables. Il faut d'ailleurs remarquer que les vents de tempêtes ne viennent pas toujours de la direction de la terre la plus proche.

Observations. — D'ailleurs ces formules ne donnent que des indications ; nous résumons dans le tableau suivant les longueurs, hauteurs et vitesses indiquées par divers observateurs en pleine mer. Il est inutile de faire remarquer les discordances.

Hauteur	Largeur	Vitesse m. par s.		Mers	Observateurs	Rapport de la longueur à la hauteur
		calculée $u = \sqrt{ga}$	Observée			
6,71	582	29,50	45	Atlantique	Ross	86
6,60	100	12,50	8,10	»	Nautical Magazine	15
6	78	11	7,35	»	»	13
6	91	11,90	7,20	»	»	15
?	65	10,10	6,63	»	»	?
?	60	9,50	6,63	»	»	?
6,70	104	12,50	7,86	»	»	16
5,10	65	10,10	6,60	»	»	13
8	170	15,85	15	»	Scoresby	21
?	820	35,80	35	»	Amiral Mottez	?
13	?	?	?	»	Missiessy	?
6	210	18,10	?	» (sud)	Amiral Pâris	35
7	217	18,40	?	» »	»	35
27	?	?	?	»	Ct Belcher	?
12	?	?	?	»	Ct Molony	?
10,25	158	15,60	7,50	Atlantique (G. de Gascogne)	Cialdi	15
7	580	29,50	?	Cap de Bonne-Esp.	Amiral Mottez	82
11	?	?	?	Oc. Antarctique	Novara	?
11,50	240	19,40	?	Mer des Indes	Amiral Pâris	21
5	175	16	?	»	»	35
6,50	156	15,60	?	Mer de Chine	»	24
7,50	250	19,80	?	Pacifique ouest	»	33
14	230	19,30	26	»	Abercrombie	?
33	200	17,50	5	Cap Horn	Fleuriot de Langle	6
8,10	132	14,30	12,50	Manche	Walker	16
6	100	12,30	?	Méditerranée, Philippeville	De Tessan	16

Dans les grands lacs de l'Amérique du Nord, les plus hautes vagues sont de 3,60 *m* ; cependant à Oswego, sur le lac Ontario, on en a observé qui atteignaient 5,40 *m*.

Interférence des vagues. — Les vagues parties de deux points différents peuvent se rencontrer ; elles se croisent sans se détruire et parfois se réunissent. Si deux sommets de hauteur égale se joignent, l'onde résultante, d'après les frères Weber, s'élève dans la proportion de 1 à 1,79. Si un sommet rencontre le creux d'une vague égale, l'équilibre s'établit au niveau moyen.

Direction des vagues près des côtes. — Quand une vague arrive près d'un rivage oblique à la direction du vent générateur, le frottement retarde les molécules inférieures. La portion GH (fig. 24) se meut donc moins vite que les sections CG, HD, encore en eau plus profonde ;

la vague effectue une conversion et déferle presque normalement à la côte.

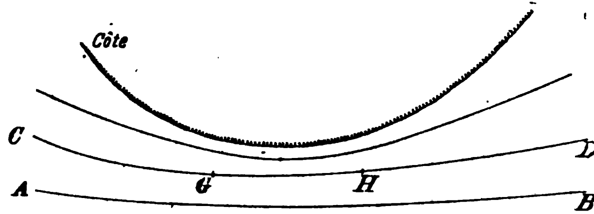


Fig. 24. — Vague près d'une côte.

Autour d'une île, elle s'infléchit et frappe par conséquent le rivage sous le vent en sens inverse de son mouvement primitif (fig. 25). C'est ce qu'on observe à Belle-Isle, c'est ce qu'on voit sans cesse sur les

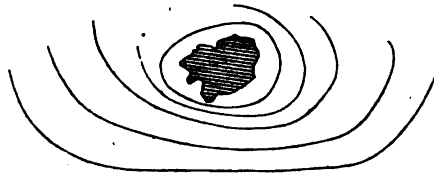


Fig. 25. — Vague près d'une île.

côtes des îles situées au milieu des vents alizés. Si d'un côté le passage autour de l'île est difficile, la lame ne contourne que de l'autre côté et semble venir de cette direction seulement. C'est ce que l'on observe à Long-Island, près de New-York.

Mais il est une observation fort importante et sans laquelle il serait impossible de comprendre la marche des courants et des matériaux le long des côtes. La lame occupe bien successivement les positions A, B, C... (fig. 26) et frappe la plage presque normalement en *a*, *b*, *c*... Seulement,

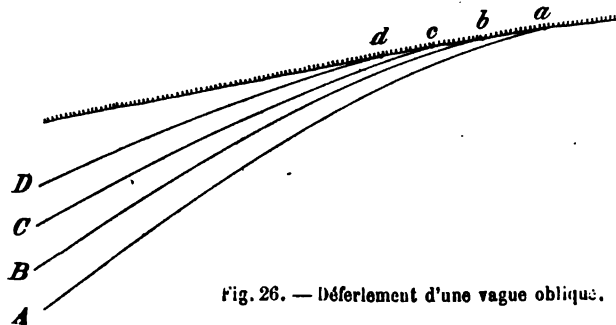


Fig. 26. — Déferlement d'une vague oblique.

elle n'atteint ces points que successivement ; l'observation montre bien

la propagation du déferlement, qui se traduit par un ruban d'écume courant dans la direction *a, b, c, d*..., de sorte qu'un flotteur jeté dans cette zone est transporté latéralement avant d'échouer sur le rivage.

Les particules d'eau sont donc projetées sur l'estran sous un certain angle ; elles retournent à la mer selon la ligne de plus grande pente, sont ramenées encore obliquement par la ligne suivante un peu plus sous le vent et ainsi de suite.

Ainsi se détermine souvent un courant littoral.

Influence de la forme du rivage. — Une vague qui s'avance dans un lit dont la largeur augmente s'étale et s'abaisse. Ce fait explique la tranquillité de l'eau dans les baies à goulet et dans les avant-ports construits de main d'homme.

Si, au contraire, la largeur diminue, la vague s'élève et peut arriver à produire de violents effets. La baie de Wick, située à l'extrémité orientale de la côte d'Ecosse, expose à la furie de la Mer du Nord un vaste entonnoir. Les vagues, qui extérieurement ne dépassent guère 7 à 8 mètres, y atteignent 13 mètres de hauteur. En frappant le môle d'abri du port, elles s'élèvent en gerbe compacte de 10 mètres d'épaisseur et passent par-dessus le parapet dont le couronnement est situé à 7 mètres au-dessus du niveau de l'eau.

Calcul de l'effort des lames. — On a vu que les vitesses orbitaires des molécules d'une vague varient avec la profondeur ; nous les supposerons égales sur une tranche d'un mètre, par exemple, afin de simplifier le calcul de leur effort sur un obstacle vertical (M. Renaud).

Soient un point A situé sur le cercle générateur de la cycloïde à une distance x, et α l'angle dont ce cercle a tourné depuis l'origine ; la longueur de l'onde 2L étant égale à la circonférence du cercle générateur, on a évidemment :

$$\frac{x}{L} = \frac{\alpha}{\pi}$$

d'où

$$\alpha = \frac{\pi}{L}\, x \text{ et } dx = \frac{L}{\pi} d\alpha$$

La vitesse orbitaire à la surface étant v, sa composante horizontale est $v \cos \alpha$.

Considérons un élément dx compris entre deux tranches verticales ;

sa masse m est $\frac{pdx}{g}$, p étant le poids spécifique $= 1026$ de l'eau de mer. La puissance vive développée sur l'unité de surface est

$$\frac{mv^2}{2} = \frac{pdx}{2g} v^2 \cos \alpha = \frac{Lpv^2 \cos \alpha}{2\pi g} d\alpha$$

Intégrant, on obtient :

$$\int_0^\pi \frac{Lpv^2}{2\pi g} \cos \alpha \, d \alpha = \frac{Lpv^2}{4g}$$

a étant la vitesse de propagation, on a :

$$v = \frac{ah\pi}{L} \qquad \text{et comme } L = \frac{\pi}{g} a^2$$

la puissance vive de la lame à la surface s'exprime par

$$\frac{\pi ph^2}{4}$$

Soit r le rayon de l'orbite des molécules à une profondeur donnée, la puissance vive à cette profondeur est

$$\frac{\pi pr^2}{2} = 805{,}41\, r^2$$

Pour une lame de 8 mètres de hauteur $2h$, on aura le tableau suivant, la surface 0 étant prise au niveau d'équilibre de la mer :

Profondeurs en mètres	Rayons des cercles générateurs en mètres	Puissance vive en kilogr.
—	—	—
0	4	12882
2	2,42	4751
4	1,47	1770
6	0,89	640
8	0,54	240
. . .	. . . . .	. . . . .

En prenant les profondeurs en mètres pour abscisses, et pour ordonnées les puissances vives, on a la courbe (fig. 27) dont l'aire, égale à 27 684 kilogrammes, représente l'effort sur un mètre courant d'un ouvrage de 8 mètres de hauteur.

Cette courbe est bien analogue à celle que Stevenson a tirée de ses expériences décrites plus loin sur la puissance des vagues à différentes profondeurs à Dunbar. On voit que dès 6 mètres de profondeur l'effort est très réduit.

D'après le lieutenant Gaillard, pour une vague qui se brise dans une profondeur d'eau égale à sa hauteur, l'effort maximum a lieu au-dessus du niveau d'équilibre à une hauteur égale au dixième de la hauteur de la vague ; de là, l'effort diminue jusqu'à zéro à la crête, élevée des 3/4 de la hauteur au-dessus de la position d'équilibre.

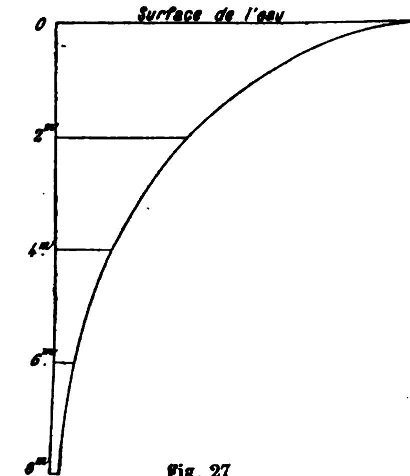


Fig. 27
Courbe représentant l'effort de la vague.

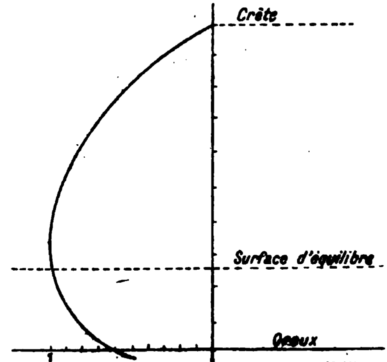


Fig. 28. — Effort des vagues (Gaillard).

Au creux, situé au quart en dessous, l'effort est encore égal au sixième de l'effort maximum. La figure 28 indique les résultats de plus de cent observations.

Une pierre de densité 2 ne pèse dans l'eau que 1 000 kilogrammes environ par mètre cube. Supposons-là un ellipsoïde de révolution dont le grand axe est le double du petit ; son poids est

$$\frac{1000 \pi a^3}{3}$$

Sa section principale est $\frac{\pi a^2}{2}$ et l'effort de la vague à 6 mètres de profondeur est $\frac{640 \pi a^2}{2}$.

Pour que cet effort puisse remuer la pierre, il faut donc que ces deux quantités soient au moins égales, d'où l'on tire

$$a = 0{,}96 \; dm^3$$

Ainsi, une pierre de un décimètre cube ne serait pas remuée à 6 mètres de profondeur.

En réalité, les enrochements des ouvrages en mer sont déplacés à des profondeurs plus considérables. A Ajaccio, le môle de la citadelle

a subi des avaries dans son infrastructure, bien qu'elle fût protégée jusqu'à la côte — 7 mètres. Il aurait fallu, pour éviter les dégradations, faire descendre les blocs protecteurs jusqu'à — 10 mètres.

Ces calculs ne donnent donc que des indications sur la puissance relative des vagues à diverses profondeurs, car bien que l'on n'ait jamais mesuré de lames de 8 mètres de hauteur dans la Mer du Nord, on y a constaté, comme on le verra ci-après, des efforts de 36 tonnes, qui correspondent à des vagues dont la hauteur serait donnée, d'après la formule précédente, par l'expression

$$805{,}41\ h^2 = 36\ 000$$

d'où $h = 13{,}25$ *m*. La formule du lieutenant Gaillard indiquerait 10,80 *m*.

Lorsque les vagues frappent un rivage accore ou un ouvrage plus ou moins vertical et même incliné jusqu'à 45°, elles se brisent brusquement et sont projetées en *paquets de mer* qui s'élèvent parfois à de grandes hauteurs, ainsi qu'on le verra, en développant une énergie considérable.

PUISSANCE RÉELLE DES VAGUES

Un des éléments les plus importants à connaître, aujourd'hui surtout que la construction des ports s'effectue parfois sur des points fort exposés, c'est l'effort réel que peuvent déployer les vagues.

Le lieutenant Gaillard, mesurant cette énergie, est arrivé à la conclusion suivante : Les vagues en forme de cycloïde ordinaire ont une énergie en livres-pieds, pour chaque pied de longueur mesuré le long de la crête, et pour la portion au-dessus du plan horizontal tangent au creux, égal à $6{,}3\ h^3$, h étant la hauteur totale de la vague.

Cette formule revient à peu près à la suivante, qui donne en mètres et kilogrammes la pression par mètre carré :

$$P = 345\ h^2$$

Une vague de 8 mètres de hauteur exercerait donc une pression de 22 000 kilogrammes.

Minard estimait cet effort de 3500 à 5000 kilogrammes par mètre carré, Viala de 3550 à 4040.

On a dû, depuis, beaucoup augmenter ces chiffres.

En 1867, la tour balise du Petit-Charpentier, située dans un îlot à l'embouchure de la Loire, au fond d'une crique en entonnoir vers laquelle les rochers avoisinants dirigent les lames, fut brisée durant une tempête. Cette tour avait 6,30 *m* de hauteur ; le diamètre était à la base de 3,20 *m*, au sommet de 2,60 *m*. La rupture avait eu lieu au niveau de la deuxième assise inférieure et toute la partie supérieure, détachée, avait glissé de quelques millimètres sur la base.

Leferme a calculé la force qui avait occasionné la rupture. Ecartant toute idée de malfaçon, le travail ayant été suivi avec soin, il égale le moment de l'effort brisant à la somme des moments de résistance provenant : 1° du poids du cylindre déplacé; 2° de la force tirante de la maçonnerie ; et il trouve que l'effort de la lame a été de 23 400 kilogrammes par mètre carré.

Encore n'est-ce qu'un minimum ; car dans le calcul, dit l'auteur, la force du mortier n'a été évaluée qu'à 5 kilogrammes, tandis qu'elle a été trouvée expérimentalement de 10 à 15 kilogrammes. Aussi Leferme estime-t-il que l'effort n'a pas dû être moindre de 30 000 kilogrammes par mètre carré.

Mais il s'agit là d'une lame exceptionnelle, car le calcul établit qu'une fois le cylindre brisé, il eût suffi d'un nouvel effort de 4 000 kilogrammes pour le renverser totalement, ce qui n'a pas eu lieu. La force ordinaire des vagues, d'après Leferme, n'est donc que de 4 à 5 000 kilogrammes ; il faut attribuer la perte inexpliquée de certains navires à des lames extraordinaires comme celle du Petit-Charpentier.

Chevallier a cherché à se rendre compte de la force des lames en les faisant choquer contre une plaque mince percée d'un trou rond de 2 centimètres de diamètre, par lequel s'échappait un jet parabolique, dont l'amplitude indiquait la vitesse. Il a reconnu ainsi que pour les lames ordinaires, la vitesse v qui atteint l'obstacle est celle qui résulterait de la hauteur h de la vague. On a donc

$$v = \sqrt{2gh} \text{ ou } v = 4{,}43\sqrt{h}$$

On a ainsi le tableau suivant en mètres

Hauteur des vagues . .	1	2	3	4	5	6	7	8
Vitesse V	4,43	6,26	7,67	8,86	9,88	10,85	11,74	12,54

Quand la mer était agitée, la vitesse était sensiblement plus faible que celle donnée par la formule, fait qui semble contradictoire avec les opi-

nions courantes, mais que peuvent expliquer les déviations causées par les entrecroisements de vagues secondaires développées sur les vagues principales.

Au reste, ces expériences ne semblent pas s'accorder avec les faits d'observation ; l'action des vagues étant proportionnelle au carré de leur vitesse serait donc simplement proportionnelle à leur hauteur ($v^2 = 2gh$) ; l'énergie d'une lame de 8 mètres ne serait que huit fois plus forte que celle d'une lame d'un mètre, ce qui est certainement loin de représenter la vérité.

Les calculs, si intéressants qu'ils soient, sont toujours basés sur des hypothèses qui peuvent faire varier les résultats dans des limites étendues.

Observations.— Il existe de nombreuses observations de la violence des vagues. A Alderney, des blocs de 9 tonnes ont été projetés sur le sommet des môles à plus de 13 mètres de hauteur. Au phare de Bishop Rock une cloche a été brisée par des *paquets de mer* à 30 mètres au-dessus du niveau de l'océan pendant une tempête de l'hiver de 1860. L'eau ainsi soulevée avait donc encore une grande force ; cependant il faut noter que la seule projection à 30 mètres de hauteur suppose déjà un effort de 30 000 kilogrammes par mètre carré. Au phare d'Eddystone l'eau s'est élevée à plus de 50 mètres.

A l'ancien phare d'Eddystone, la galerie de granite avec l'appareil optique, le tout pesant 60 tonnes, a été enlevée par la mer à une hauteur de 18 mètres au-dessus du niveau de l'eau. La tour en fer du phare de Calf Rock a été brisée à 25 mètres de hauteur. On prétend que sur les côtes de Cornouailles et de Norvège les ondes ont été lancées jusqu'à plus de 100 mètres.

M. Th. Stevenson et l'éminent géologue Roderick Murchison ont constaté dans les îles Shetland que des blocs de 5, de 8 et même de 13 tonnes ont été arrachés par les vagues et transportés jusqu'à 20 mètres au-dessus du niveau des plus hautes mers, après avoir gravi des pentes de 10 et 12° sur une longueur de 120 mètres.

Dans les îles Scilly, on a vu la mer mouvoir un rocher de 200 tonnes.

On pourrait multiplier des exemples semblables ; mais les accidents arrivés aux constructions maritimes offrent encore plus d'intérêt.

A Ymuiden, à l'entrée du canal d'Amsterdam, où la mer n'est pourtant jamais très violente, des blocs de 20 tonnes protégeant la base des

môles ont été soulevés par la mer d'une hauteur de 3,50 *m* et projetés à l'intérieur du chenal.

Au phare de Dhu Heartach, près de la côte occidentale de l'Ecosse, quatorze pierres, pesant 2 tonnes chacune, maçonnées en queue d'aronde au ciment de Portland à une hauteur de 11 mètres au-dessus du niveau de la pleine mer, ont été arrachées et emportées par les vagues.

A Wick, une masse de maçonnerie de 1 350 tonnes a été rejetée dans le bassin; et une autre, de 2 600 tonnes, qui l'avait remplacée, subit le même sort. Mais, malgré l'assurance de l'ingénieur constructeur du môle, M. Stevenson, que les fondations n'avaient pas cédé, M. Shield pense le contraire d'après les renseignements qu'il a pu recueillir.

L'opinion de M. Shield a pu sans doute se modifier depuis, à la suite des faits suivants :

Sous sa direction, on construit en ce moment à Peterhead, au nord-est de l'Ecosse, un port de refuge dont l'ouvrage de protection est du type vertical, composé de blocs de béton de 40 tonnes, posés en assises horizontales, assemblés et cimentés au-dessus des basses mers. Les vagues dont la hauteur est inférieure à 3,50 *m* ne font qu'osciller le long du parement sans se briser et n'exercent comme pression que celle due à leur hauteur. Il en est autrement pour les grandes vagues.

Il y a eu en octobre 1898 des blocs déplacés jusqu'à 11 mètres au-dessous du niveau de basse mer, par des lames de 9 mètres de hauteur. Une portion du môle, à la cote — 3,20 *m*, pesant 3300 tonnes, a pivoté sur elle-même de 5 centimètres, sans se disloquer, en glissant sur les blocs inférieurs, qui n'ont pas bougé.

Les vagues, qui en se brisant s'élevaient à une hauteur de 36 mètres, agissaient sur la partie externe des blocs, mesurant 104 mètres carrés. M. Shield a déterminé par des expériences directes à 0,70 le coefficient de frottement mutuel des blocs. La force qui a occasionné le glissement était donc de 2310 tonnes, soit 22 tonnes par mètre carré.

La profondeur de la mer en ce point est de 16,50 *m* ; l'amplitude de la marée de 3,35 *m*. La longueur des vagues était de 160 à 180 mètres.

La figure 29 indique bien l'effet d'une plage en talus sur l'action des lames. Le mur de quai en question est adjacent au môle de Peterhead. Dans l'état figuré, avec une profondeur de 2,50 *m* au-dessus du rocher, les vagues de 1,50 *m* oscillent le long du parement sans se briser ; mais quand la marée baisse et que le niveau n'est plus qu'au

talus inférieur, elles se transforment en vagues de translation et frappent le mur avec une violence incroyable.

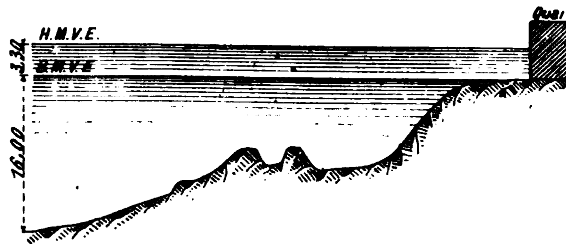


Fig. 29. — Quai près de Peterhead.

A Bilbao, les blocs de 60 et 100 tonnes qui composaient la superstructure du nouveau môle extérieur ont été à plusieurs reprises pendant deux hivers balayés par les vagues et l'on a dû, ainsi qu'on le verra, adopter un autre système.

A Naples, la tempête du 3 décembre 1872 a déplacé une masse de maçonnerie de 128 mètres cubes située à 1,40 *m* au-dessus du niveau moyen de la mer. A Cherbourg, un bloc de béton de 20 mètres cubes placé sur la risberme de la digue et exposé à la mer par trois faces fut enlevé et porté à plus de 10 mètres de distance. A Cette, une masse de béton de 70 mètres cubes, dont la face exposée à la mer n'avait que 7 mètres carrés et demi, a été déplacée d'un mètre horizontalement.

A Oran, pendant la tempête du 8 février 1886, on a calculé que l'effort sur les blocs de la jetée qui furent déplacés avait été de 5 à 6 tonnes par mètre carré; et que pour le déplacement de deux blocs du parapet, il avait été de 30 tonnes par mètre carré.

Sur les côtes où la mer est peu profonde, les effets de la mer sont beaucoup moins violents. Ainsi, les expériences instituées aux Etats-Unis devant le port de Saint-Augustin n'ont donné au maximum qu'une pression de 3 100 kilogrammes par mètre carré; cependant on y a vu un bloc de béton de 725 kilogrammes élevé à 40 *cm* de hauteur et un autre de 9 tonnes et demi soulevé de plus de 6 centimètres, durant une tempête dont la vague maxima n'a pas dépassé 1,75 *m* de hauteur.

Dynamomètre marin. — M. T. Stevenson a imaginé un appareil mesurant directement la force de la lame et il lui a donné le nom de dynamomètre marin (fig. 30).

Un disque circulaire en fer A, de 15 centimètres de diamètre, porte 4 tringles BBBB, qui passent à frottement doux dans les deux fonds E

et F d'un cylindre DD assujetti au moyen d'un bâti boulonné sur une pierre. Chaque tringle est munie d'un ressort C, fixé d'une part en H sur la tringle, d'autre part en I sur le fond E. Un curseur en cuir G peut glisser sur la tringle.

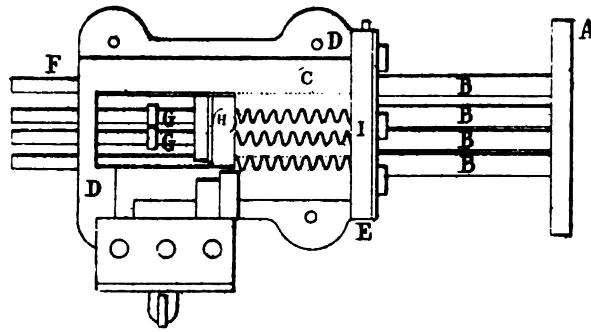


Fig. 30. — Dynamomètre marin.

Sous le choc de la lame contre le disque A, les tringles s'enfoncent dans le cylindre; et le curseur, s'appuyant contre le fond F, glisse sur la tringle. Puis le ressort ramène en avant disque et tringles, mais le curseur reste à sa nouvelle position G'.

On gradue l'instrument en chargeant le disque et inscrivant le poids qui amène le curseur à chaque position; M. Stevenson donne à cet effet la formule

$$d = \frac{\mathrm{D}a}{\mathrm{W}}$$

dans laquelle on a :

W, poids en tonnes qui comprime le ressort sur une longueur D en pouces.

a, surface du disque en pieds carrés;

d, longueur en pouces comprimée par la force d'une tonne par pied carré.

Le dynamomètre marin a été expérimenté par M. Stevenson sur divers points des côtes anglaises, à Skerryvore, sur l'Atlantique, sur la côte orientale de l'Ecosse, à Bell Rock sur la mer du Nord, à Dunbar et à Buckie (Banffshire). Voici les résultats obtenus :

1° La force des vagues est trois fois plus grande en hiver qu'en été;

2° A Skerryvore, l'effort le plus considérable a été de 29 800 kilogrammes par mètre carré; à Bell Rock de 15 000; à Dunbar de 30 000 et à Buckie de 36 000;

3° La force des vagues varie suivant la hauteur à laquelle est fixé

l'appareil. La figure 31 donne la courbe représentant la pression trouvée au moyen des dynamomètres *a*, *b*, *c*, *d*, *e*, placés à diverses hauteurs, encastrés à fleur du parement dans la maçonnerie du môle de Dunbar.

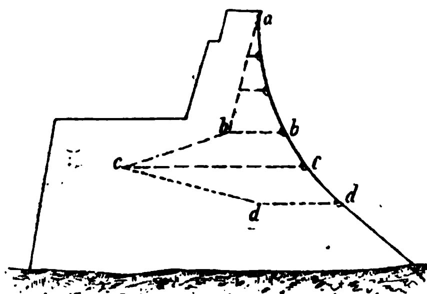


Fig. 31. — Force des vagues suivant la hauteur.

4° L'accroissement de force vive est considérable quand la lame se brise.

Une partie exposée du rocher à Skerryvore fut choisie pour les expériences. On y fixa deux dynamomètres; l'un (n° 1) à quelques pieds plus bas et à 12 mètres plus au large que le n° 2.

A mi-marée, la force des lames, brisée sur les rochers extérieurs, n'avait guère d'action sur les instruments. Mais à pleine mer, la profondeur étant plus grande, les lames n'étaient pas autant arrêtées, la force était double sur l'instrument n° 2 placé plus à terre et plus haut.

A Dunbar, au moyen de dynamomètres placés sur des pieux en avant d'un môle en construction et d'autres fixés sur le mur lui-même à diverses hauteurs, on a constaté que la lame qui se brisait sur le mur était 22 fois plus forte que celle qui heurtait en passant les instruments des piliers. Il est juste de remarquer que ce choc ne pouvait en tout cas être considérable, la vague contournant aisément les pieux.

Ces expériences prouvent bien qu'il est impossible de calculer la force d'une vague d'après les éléments qui entrent d'ordinaire dans les calculs de l'hydrodynamique.

On a également fait au môle du port d'Oswego (lac Ontario) des expériences sur la force des vagues à différentes profondeurs. Le dynamomètre était attaché face aux lames et a donné les pressions suivantes :

A la surface	4 700 kilogr.	par mètre	carré.
A 2,50 *m* de profondeur.	125	»	»
A 5 mètres » .	0	»	»

Dans une deuxième expérience on a trouvé :

A 2,50 *m* au-dessus de la surface .	4 700 kilogr.	par mètre	carré.
A la surface	4 400	»	»
A 2,50 *m* de profondeur	0	»	»

La profondeur de l'eau étant d'une dizaine de mètres.

On a, dans le même lac, pour apprécier l'effet des vagues sur le sable à diverses profondeurs, ancré sur un fond en talus, à 1,80 *m*; à 3,60 *m*; à 5,50 *m* et à 6 mètres de profondeur, des caisses vides, régulièrement espacées sur une longueur de 600 mètres. Après une tempête, la première caisse était pleine de sable, la seconde à moitié remplie, la troisième en contenait fort peu et la quatrième pas du tout.

Les expériences au moyen du dynamomètre ne sont pas tout à fait concluantes, car l'angle sous lequel la vague vient frapper le disque influe sur la puissance du choc ; il doit y avoir des réactions dues aux tourbillons, à l'influence des parties choquées, etc.; mais comme les résultats obtenus concordent avec ceux qu'on a déduits d'autres observations et que d'après les considérations précédentes ils devraient être encore plus forts que ceux constatés, il est à coup sûr prudent, dans les endroits exposés, de compter sur des efforts de 30 tonnes au niveau de la mer. Dans les océans où les tempêtes sont d'une violence inconnue sur nos côtes, comme dans la mer des Indes, ces efforts doivent certainement être de beaucoup dépassés, mais on n'a pas d'observations directes. A Madras, les môles, composés de blocs de 27 tonnes, assemblés verticalement à tenon et mortaise, ont été complètement détruits dans la partie convergente, où ils étaient presque normalement exposés à l'action des vagues.

Il est probable, en effet, que le choc doit être d'autant plus violent que les filets liquides frappent normalement l'obstacle.

Sous-pressions. — L'eau, pénétrant dans les joints entre les blocs, transmet intégralement sa pression sur chaque unité de surface et peut produire une action considérable. Elle agit d'une façon plus désastreuse encore en y comprimant l'air. C'est ainsi qu'à Aberdeen, à Alderney, des avaries ont été occasionnées aux môles par ces sous-pressions. Le tassement produisait dans la maçonnerie des chambres où la mer comprimait l'air, dont la pression déterminait de nouvelles avaries.

La sous-pression peut provenir de l'eau elle-même, pénétrant également par les fissures et les joints des maçonneries. M. Mallet rapporte

avoir vu des blocs de granite, servant de pavés, soulevés et projetés vers la terre par des paquets de mer retombant sur eux derrière le parapet d'un mur de quai. La force venant de haut en bas, il peut paraître étrange que les blocs fussent soulevés; c'est que la colonne liquide, entrée par les joints, pressait la face inférieure des pavés plus que leur face supérieure, la différence de pression étant égale à l'épaisseur du bloc, qui était de 30 à 40 centimètres.

Profondeur d'action des vagues. — Il est d'une grande importance pour l'établissement des ouvrages en mer de connaître la limite inférieure de l'action des vagues.

D'après Airy, à une profondeur égale à la longueur de l'onde, le mouvement des particules est $\frac{1}{535}$ de celui qu'elles ont à la surface; cette proportion, à une profondeur double, est réduite à $\frac{1}{286690}$. Les frères Weber fixent à 350 fois la hauteur de l'onde la profondeur à laquelle se fait sentir son influence.

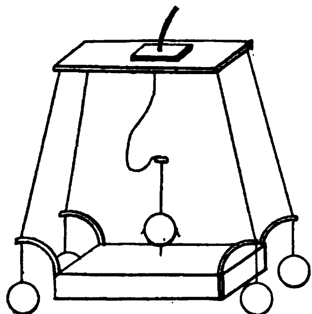


Fig. 32. — Expérience d'Aimé.

Aimé s'est servi pour étudier pratiquement la question, de l'appareil suivant : Une boîte carrée lestée est munie à ses coins d'arcs en fer terminés par un anneau; il y passe des cordelettes portant à leur extrémité des boulets qui servent à tendre une table supérieure pendue à une corde qui maintient tout l'appareil dans la mer. A la table est suspendue, par une petite corde, une toupie en bois munie de pointes à son extrémité et sur ses côtés (fig. 31). Cette cordelette a une longueur telle que la toupie ne peut osciller que lorsque les boulets touchent le fond.

L'appareil a été posé à diverses profondeurs et a subi dans toutes les expériences l'action de lames de 2 à 3 mètres de hauteur. Jusqu'à 18 mètres on a éprouvé une violente agitation; et même à 40 mètres, l'influence de la vague se faisait encore sentir, bien que faiblement.

On la constatait par les trous que les pointes de la toupie perforaient dans une plaque de plomb placée sur la boîte; ces trous étaient symétriquement rangés, ce qui prouvait une oscillation et démontrait le mouvement orbitaire des vagues.

Un calcul précédemment fait établit qu'une pierre d'un décimètre cube ne serait pas remué à 6 mètres de profondeur par des lames de 8 mètres; mais sir John Coode a constaté par lui-même que de gros galets étaient déplacés sur le Chesil Bank à une profondeur de 12,50 *m*.

Du galet et du lest calcaire pesant, jetés par les navires dans des fonds de 18 mètres devant Sunderland, ont été ramenés à la plage.

La frégate *la Thétis* ayant sombré par 22 mètres de profondeur devant le cap Frio au Brésil, fut retrouvée au bout de quelque temps réduite en pièces; les morceaux étaient enfouis dans le sable.

Effet des hauts-fonds. — L'eau étant incompressible, quand une vague en mouvement rencontre un haut-fond abrupt, situé à une profondeur moindre que celle de la limite de son action, elle s'exhausse d'un seul coup; le sommet, moins retardé dans sa marche, se projette en avant et peut même déferler en partie si le banc rencontré n'est pas trop profond. Le volume et la hauteur de la vague sont donc diminués; si cet effet se produit sur plusieurs bancs successifs, on conçoit qu'ils constituent une protection pour les eaux situées sous le vent; ainsi est constituée la rade de Dunkerque.

Même quand les hauts-fonds gisent à des profondeurs plus considérables, leur action se fait sentir à la surface; ainsi, les navires embarquent parfois du sable en recevant les paquets de mer projetés par le banc de la Casse, enterré à 23 mètres à l'ouest de la Sardaigne. L'influence du banc de Terre-Neuve, situé de 125 à 200 mètres de profondeur, se fait sentir par la rudesse de la mer à la surface.

Ressac. — Ressac contre un mur vertical. — La vague qui frappe un mur vertical est en partie réfléchie; une autre partie prend le long de la paroi un mouvement d'oscillation de considérable amplitude.

En outre de la projection, par l'oscillation de bas en haut, des paquets de mer qui retombent sur les ouvrages protégés et y occasionnent parfois de graves avaries, celle de haut en bas produit souvent au pied du mur des excavations dangereuses.

Le même effet se manifeste le long d'un obstacle qui, sans être vertical, est très abrupt et peut même être incliné à 45° d'après Scott Russell. Les enrochements des môles sont dans ce cas, et sans doute le

ressac qu'éprouvent les vagues à leur rencontre contribue-t-il à en enlever les pierres. C'est à cette cause que M. Vernon-Harcourt attribue les incessantes dégradations éprouvées par le môle d'Alderney et qu'on eût peut-être évitées en commençant plus profondément la construction de la superstructure.

On est souvent obligé, pour éviter ces excavations, de protéger le pied des môles par une risberme ; elle doit être assez large, car l'affouillement se produit parfois à une certaine distance du mur, ainsi qu'on l'a constaté à Cherbourg et aux jetées de Dieppe, du Havre et de Fécamp.

Ressac par réflexion. — Les vagues sont aussi réfléchies horizontalement par leur choc contre des surfaces verticales. L'exemple le plus connu est celui du port de commerce de Cherbourg. Lors des coups de vent de l'O au NO il régnait une grande agitation dans l'avant-port. Elle n'avait pas lieu à l'origine, et s'est manifestée après la démolition de la partie intérieure de la jetée de l'ouest, puis par suite de la destruction de la *Butte menteuse* qui joignait la jetée démolie au quai occidental. Les vagues du NO, après avoir frappé la partie de la jetée de l'est qui dépasse l'autre, étaient transmises par réflexion contre le quai ouest, puis dans l'avant-port. On a dû rétablir la roche sous la forme d'un épi.

Plus tard, il a fallu encore placer dans la jetée de l'est un brise-lames. Ce moyen était préférable au premier qui a le tort de créer dans l'avant-port un obstacle d'autant plus fâcheux qu'il se trouve vis-à-vis d'une cale de construction.

L'exemple de la Ciotat est aussi à citer. Le quai du nord s'arrêtait d'abord au fort Bérouart ; les lames, après avoir dépassé le môle du sud, passaient devant la passe sans entrer dans le port. Plus tard, on construisit en avant du fort un môle circulaire pour abriter la darse des vents d'est et nord-est ; il eut pour effet de recueillir les lames du sud qui causèrent dans le port un violent ressac.

A Naples, après l'érection du môle *dai Granili* sur une longueur de 400 mètres, les vagues en le frappant déterminèrent dans le port un ressac si violent qu'on dut interrompre le travail pour prolonger auparavant le môle San Vincenzo destiné à couvrir le premier. C'est aussi ce qui se passe à Douvres en ce moment. C'est ce qu'on a également observé à Port Empédocle, en Italie.

Après la construction, à Gênes, du mur de quai de 800 mètres qui s'étendait de la crique *delle Grazie* à la batterie *della Cava*, les bâtiments mouillés à la station du *Passo Nuovo*, à l'enracinement du *Molo Nuovo*, éprouvèrent un violent ressac pendant un coup de vent de 1875. On observa de pareils effets dans divers ports italiens après l'établissement de murs de quai.

Pour éviter ces ressacs, on pose presque en principe en Italie qu'il faut conserver au fond des darses une plage de sable sur laquelle les lames peuvent s'amortir. C'est ce qu'on a fait à Barletta et à Porto Maurizio où l'on a obtenu une grande tranquillité.

Transmission latérale des lames. — On donne aussi improprement le nom de ressac à un phénomène tout différent qui consiste tout simplement dans un effet de guidage des lames par les murs de protection, surtout quand ils sont courbes ou brisés. Ce cas est tellement fréquent qu'il est inutile d'en donner des exemples ; nous croyons cependant nécessaire d'indiquer comment on y a parfois remédié.

Aux Sables-d'Olonne, où le ressac était très violent dans l'avant-port, on a construit un court épi qui n'a d'ailleurs pas suffi et il a fallu munir les jetées de brise-lames.

A Port-Joinville, dans l'île d'Yeu, on a successivement édifié en dehors des môles primitifs un môle perpendiculaire à celui du nord et une digue circulaire ; ce n'est qu'à ce prix qu'on a obtenu le calme.

CHAPITRE VII

COURANTS

La mer est sillonnée de nombreux courants. Il en existe de généraux, qui ont pour origine la différence de densité entre les eaux en divers points, différence qui provient d'une inégalité de température et de salure. Le liquide le plus léger se précipite, pour ainsi dire, vers le plus lourd et celui-ci effectue, dans les couches inférieures, le mouvement inverse : c'est ce qui a lieu, par exemple, au détroit de Gibraltar, où règne un courant superficiel de l'Atlantique vers la Méditerranée et un flux en sens contraire dans les couches profondes. On conçoit que le contre-courant est d'ailleurs obligatoire pour maintenir le niveau des mers. C'est cette incessante circulation qui, malgré l'afflux d'eau douce des fleuves et l'évaporation sur d'autres points, assure à l'océan une composition constante.

Le plus connu de ces grands courants océaniens est le *Gulf Stream* (Courant du Golfe), qui vient de la mer des Antilles, effectue un circuit dans le golfe du Mexique et, passant au sud de la Floride, se dirige vers l'Europe où il porte la chaleur de ses eaux aux côtes de France et d'Angleterre, puis se divise en deux branches dont l'une contourne l'Islande, tandis que l'autre va jusqu'au Spitzberg. Le courant de Malabar et celui du Japon (*Kuro Sivo*, le courant noir) jouent un rôle analogue dans la mer des Indes et le Pacifique.

Les courants généraux existent dans tous les océans et figurent sur toutes les cartes ; il est donc inutile de s'en occuper ici, mais il importe d'en tenir compte dans les études d'un établissement maritime.

Courant littoral. — En dehors de ces vastes circulations d'eau, il existe encore des courants localisés réguliers ; parmi les plus intéressants, il faut citer les courants littoraux qui lèchent les rivages de certaines mers. Dans la Méditerranée, il en est un qu'on décrit comme partant du détroit de Gibraltar, passant devant les côtes d'Afrique et

revenant à son point de départ en longeant successivement les rives asiatiques et européennes. Il marcherait donc toujours de gauche à droite pour le spectateur qui regarde la mer. La vitesse est variable, mais toujours très faible, de 5 à 6 centimètres par seconde. Il passe à 3 ou 4 kilomètres de la côte. Ce courant n'est pas aussi général qu'il est décrit et il disparaît devant certains points, tandis qu'en d'autres localités, en Algérie, il se rapproche assez du rivage pour frapper les caps avancés. Près de terre, sur les côtes françaises, les courants sont très variables et dépendent de la direction du vent.

Dans la Baltique, il existe également un courant littoral sur les côtes allemandes ; il va de l'ouest à l'est. Il est déterminé par les vents régnants qui soufflent dans cette direction.

La cause en est probablement la même dans la Méditerranée. Sur les côtes de France et d'Algérie, le vent dominant est celui du nord-ouest ; le long des rives de notre Colonie, il doit donc pousser le courant de l'ouest vers l'est. Par rapport aux côtes languedociennes et provençales, ce vent du nord-ouest souffle de terre et n'a pas d'action sur les lames et les courants ; ce sont les vents de sud-est qui poussent les courants de l'est à l'ouest. Nous n'avons pas de données précises pour les autres rivages méditerranéens, mais il est à supposer que les choses se passent partout de même.

La Baltique et la Méditerranée sont des mers sans marées ; sur la côte du Chili, où l'amplitude de la marée atteint 1,50 *m* à 2 mètres, il existe un courant littoral qui va du sud au nord, sans doute déterminé par les vents violents du sud-ouest qui règnent jusqu'au 30° degré de latitude ; on peut l'attribuer aussi en partie au courant de Humboldt, qui du pôle sud se dirige vers les côtes du Pérou.

Courants de marée. — Il est évident que lorsque la mer monte pendant six heures le long d'une côte, dans une baie, ou dans une mer intérieure comme la Manche qui se comporte presque comme un fleuve, cette ascension ne peut être produite que par un flux d'eau ; un reflux s'opère pendant les six heures suivantes. Il y a donc de véritables courants déterminés par l'onde-marée, et il est clair que la marée montante doit se diriger vers la terre, le jusant vers le large.

S'il n'existe près de la côte considérée aucun autre courant, le régime de ceux de la marée est donc très simple ; dans le cas contraire, les vitesses et les directions des divers courants se composent.

C'est surtout dans la Manche qu'ont été faites des observations à ce sujet. Ainsi que nous l'avons déjà montré, l'onde venant de l'Atlantique s'enfonce dans cette mer comme un coin; la tête du flot suit les grandes profondeurs le long de l'axe, tandis que les côtés de l'onde se dirigent vers les rives anglaise et française. La vitesse de la tête étant plus grande, il en résulte un courant longitudinal de l'ouest vers l'est; c'est le contraire pendant le jusant.

Au moment où commence le flot, qui se dirige vers la terre, il rencontre le courant d'ebbe, allant à l'ouest; les deux directions longitudinale et transversale se combinant, le courant résultant oblique vers le sud du côté de la France, vers le nord du côté de l'Angleterre.

Suivons ce qui se passe sur les côtes françaises: La vitesse du flot augmentant avec le remplissage du canal, tandis que le courant du jusant diminue jusqu'à s'éteindre, l'obliquité de la résultante va aussi en diminuant et tout le flux se porte enfin vers l'est. La direction de la résultante passe donc peu à peu de l'ouest à l'est par le sud, c'est-à-dire en sens contraire de la marche des aiguilles d'une montre; il est aisé de voir que ce mouvement continue pendant le jusant.

Sur la côte anglaise, c'est nécessairement une rotation en sens inverse qui se produit, c'est-à-dire dans le sens des aiguilles de la montre. On dit que ce mouvement giratoire est direct, tandis qu'il est inverse sur le littoral de France.

Dans le Pas-de-Calais, les courants longitudinaux resserrés entre les terres augmentent de vitesse et acquièrent une prépondérance telle que leur renversement est directement alternatif, c'est-à-dire qu'il se fait diamétralement en sens contraire. Il en est de même au large des côtes dans le reste de la Manche, là où s'avance tout droit la tête du flot ou du jusant.

A l'ouest du cap Barfleur, les courants sont encore giratoires par suite du croisement d'ondes dérivées qui suivent les découpures des côtes de l'entrée de la Manche.

Vitesse des courants de marée. — En appelant v la vitesse moyenne du courant de flot et V la célérité de l'onde marée, h la demi-hauteur de l'onde-marée et H la profondeur de la mer, M. Comoy a trouvé qu'on a la proportion

$$\frac{v}{V} = \frac{h}{H}$$

Or $V = \sqrt{gH}$ et comme l'auteur admet que le produit $h\sqrt{H}$ est constant, il est facile de voir que la vitesse du flot est en raison inverse de H. La vitesse est donc d'autant plus grande que les fonds sont faibles : ce qui se vérifie en général.

Nous avons déjà expliqué, page 33, que trois heures environ avant et après la haute mer il n'y avait pas de courant. On comprend qu'il doit en être ainsi, puisqu'à ce moment la mer occupe son niveau moyen, c'est-à-dire qu'elle est dans l'état d'équilibre où elle se tiendrait s'il n'y avait pas de marées. Au contraire, à haute et basse mer les molécules sont dans la position la plus éloignée de l'état d'équilibre, et la vitesse des courants est maxima.

Ces vitesses atteignent jusqu'à 2,40 *m* par seconde devant Calais. Elle n'est que de 1,50 *m* devant Dunkerque et Boulogne, moins près du goulet situé entre les deux mers. Nous avons déjà cité les ras de marée les plus violents de nos côtes.

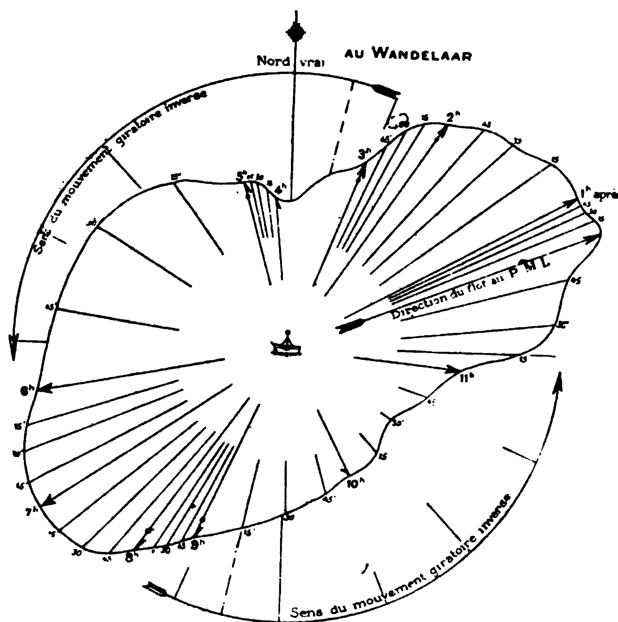


Fig. 33. — Diagramme des courants au Wandelaar.

Nous donnons, figure 33, le diagramme observé par M. Petit, l'hydrographe belge, des courants au feu flottant Wandelaar mouillé sur la côte de Belgique. Ainsi qu'on le remarque, les vitesses ne s'annulent pas complètement à mi-marée, mais elles sont beaucoup plus faibles.

Il est impossible que les masses d'eau remuées par l'action des astres suivent mathématiquement les lois déduites du calcul ; trop de facteurs secondaires interviennent dans la réalité.

Interférences des courants. — On a déjà vu le phénomène d'interférence des marées qui a lieu dans la mer d'Irlande près de Courtown ; il produit aussi un résultat qui paraît étrange au premier abord : le courant de marée y est très accentué.

La raison en est pourtant facile à comprendre : Au delà de Courtown, l'onde qui vient du sud se dirige vers le nord, puisqu'elle constitue le flot. Quant à l'autre onde, après avoir passé devant Courtown, elle continue vers le sud ; mais au nord de cette ville le jusant se produit pour elle, jusant dont la direction est septentrionale.

Les deux courants s'additionnent donc en vitesse.

Par contre, le courant disparaît dans les localités où les ondes se rencontrent à la même phase et s'ajoutent. Entre ces positions extrêmes se produisent, bien entendu, tous les phénomènes intermédiaires.

Courants du Havre. — Pour faire comprendre l'importance de l'étude des courants à l'entrée d'un port, nous citerons le régime de ceux du Havre. On sait déjà comment se forment ces deux courants qui passent devant l'entrée, l'un du NE au SO avec une vitesse de 3,30 *m* et l'autre, la *verhaule*, qui porte au N et au NO. Celle-ci se fait sentir devant les jetées trois quarts d'heure avant la pleine mer. Faible d'abord, elle atteint 2 nœuds et demi (1,25 *m* par seconde) au bout d'une demi-heure et conserve cette vitesse jusqu'à la pleine mer.

Elle s'amortit ensuite et a presque cessé quand, une heure trois quarts après, commence le jusant dont le courant porte au NO avec une vitesse d'un nœud et demi.

Le vrai flot dans la petite rade ne dure que quatre heures et demie et le jusant huit heures.

La vitesse des courants devant l'entrée ne permet guère aux grands navires d'entrer pendant leur période d'intensité maxima, ce qui diminue l'avantage de la longue durée de deux heures de l'étale, due au retour de l'onde-marée du fleuve.

Depuis quelques années, sans doute à cause des travaux accomplis dans l'estuaire, le renversement du courant se produit plus tôt que par

le passé, et l'intensité de la verhaule s'est augmentée d'une manière fâcheuse, résultat sans doute de l'endiguement de la rivière.

Effet des obstacles. — Les courants occupent en général dans la mer une largeur déterminée, et cela est vrai même pour ceux de très vaste étendue. Ainsi l'on reconnaît le Gulf-Stream à une différence bien tranchée de couleur et de température; c'est un vrai fleuve au milieu de l'Océan, comme l'a décrit Maury. Le long des côtes, les courants courent également dans un véritable lit, et il n'est pas rare d'en voir deux s'écoulant côte à côte en sens inverse. Un obstacle tel qu'un cap, un épi, un môle établi normalement au rivage, produit le même effet que dans une rivière ; la vitesse augmente à l'extrémité ; et si cet accroissement est très prononcé, le pied de l'obstacle peut être affouillé.

Souvent un courant qui passe devant une baie y détermine un contre-courant. Ces divers phénomènes ne sont d'ailleurs sensibles qu'avec des vitesses suffisantes.

Influence des courants sur les vagues. — Les courants violents ont parfois le pouvoir de s'opposer au mouvement des vagues ; ainsi à Scrabster, sur la côte d'Ecosse, le courant qui sort du Pentland Frith protège en partie la rade. A Portrush, les courants de marée arrêtent l'action des lames. Pareil effet est produit par les crues du Nil : il se forme devant l'embouchure une zone où la tranquillité est suffisante pour que les navires puissent y mouiller, tandis qu'au large la mer est violente.

CHAPITRE VIII

LA MER ET SES RIVAGES

La vaste étendue d'eau salée qui ne laisse aux continents que le quart du globe terrestre se divise en trois grands océans : l'Atlantique, le Pacifique et la Mer des Indes, qui se réunissent au sud de l'Afrique et de l'Amérique. Ces océans se subdivisent en mers secondaires plus ou moins fermées ou complètement isolées.

Profondeurs. — Les mers ne sont pas également profondes ; les sondages maxima ont été récemment obtenus par le navire anglais *Penguin* entre l'archipel Tonga et la Nouvelle-Zélande. Il a trouvé trois cavités très prononcées séparées par des hauts-fonds ; la plus creuse existe par 30° 28' de latitude sud et 176° 39' de longitude est de Greenvich ; sa profondeur est de 9 430 mètres. C'est aussi à peu près l'élévation du plus haut sommet de l'Himalaya.

Dans l'Atlantique, les profondeurs ne dépassent pas 7 000 mètres ; entre l'Europe et l'Amérique du Nord, elles sont de 3 à 4 000 mètres et se répartissent régulièrement en un plateau qui a reçu le nom de plateau télégraphique, à cause de la facilité que cette disposition a donnée à la pose des câbles sous-marins.

Température. — La température des mers varie avec la latitude, les courants, etc. Sur la côte américaine du Pacifique du sud, elle n'atteint guère plus de 12 à 14° même sous les tropiques, quand elle dépasse 22° de l'autre côté du continent, devant le Brésil ; cette basse température est due au courant de Humboldt qui vient du pôle sud.

Le fond de la mer est partout, paraît-il, à la température de + 4° C. à peu près.

Composition. — Le chlorure de sodium n'est pas le seul sel que contienne l'Océan. En voici la composition moyenne, variable selon les mers à cause de l'évaporation, de l'apport des fleuves, etc.

Eau	962,0
Chlorure de sodium	27,1
Chlorure de magnesium.	5,4
Chlorure de potassium	0,4
Bromure de magnesium	0,1
Sulfate de magnesium	1,2
Sulfate de calcium	0,8
Carbonate de calcium	0,1
Divers	2,9
	1000,0

Le résidu est composé de gaz, d'alumine et d'une foule de corps en traces seulement. Ainsi qu'on le voit, la teneur des sels est de 38‰; elle varie depuis 6‰ (mer Caspienne) jusqu'à plus de 40‰ dans la mer Rouge.

Le poids spécifique dépend de la proportion de ces matières dissoutes; on le trouve de 1 015 à 1 028, en moyenne 1026.

COTES

L'aspect et la nature des rivages diffèrent avec leur composition géologique et leur élévation. Parfois les roches éruptives, soit compactes comme le granite, soit formées de prismes ou de strates comme le basalte, s'avancent jusque dans les flots. Ailleurs, les côtes sont bordées de falaises, crayeuses comme en Normandie et au sud de l'Angleterre, ou argileuses comme sur les rives allemandes de la Baltique. On rencontre encore au bord de la mer des terrains plats, formés de matériaux meubles et même de terre végétale, enfin des plages de galets et de sable.

Erosion des côtes. — Quelle que soit la nature du rivage, il est soumis à la destruction sous les chocs répétés des vagues. Les parties les plus exposées, comme les caps, sont aussi les plus dégradées; les débris qui en proviennent vont au contraire s'accumuler dans les baies où règne un calme relatif. Ce double phénomène se résume dans la formule : les caps se rongent, les anses se comblent.

Il faut pourtant noter que certains caps non seulement ne sont pas entamés, mais au contraire s'avancent de plus en plus dans la mer; nous citerons plus loin l'exemple de Dungeness; il existe également des

baies, comme celle de Saint-Jean-de-Luz, qui loin de se combler s'élargissent malgré tous les obstacles.

Dans les phénomènes maritimes, il faut se garder de généraliser et d'appliquer comme lois les résultats observés sur des points déterminés, même en grand nombre. Seules, des études spéciales peuvent indiquer les conditions de la localité où l'on veut fonder un établissement.

Côtes rocheuses. — Les roches compactes ne sont entamées que lentement ; les parties érodées, triturées et réduites en matériaux ténus, forment de la vase qui ne peut séjourner dans la zone d'action des vagues. Entraînée par les courants, elle se dépose dans les grands fonds où elle n'est plus remuée, et la distance à laquelle elle se trouve de la côte indique la limite où ne se fait plus sentir la puissance des ondes.

On trouve souvent au milieu de ces côtes rocheuses des baies fermées provenant de la disposition même des terrains ou de la décomposition de filons tendres. Leur accès est facile, puisque les débris de l'érosion sont emportés et que le pied des rochers intacts reste accore. Ces baies constituent d'excellents ports naturels.

Plages de galets. — Des roches fissurées comme le basalte, il se détache parfois des blocs volumineux, soit sous le choc des vagues, soit sous l'influence des eaux terrestres ou pluviales qui s'infiltrent et dont la gelée augmente l'action désagrégeante. Ces blocs, en tombant, se brisent en morceaux que les lames réduisent encore et polissent. C'est l'origine de grosses pierres, improprement appelées galets, qu'on trouve sur certaines plages. D'autres fois, ces pierres proviennent de torrents qui les ont arrachées sur leur parcours, dans les pays de formation éruptive.

Les côtes de la Manche, en France et en Angleterre, sont bordées en partie de falaises crayeuses dont la hauteur atteint parfois 100 mètres. Leur base est incessamment attaquée et rongée par les vagues, tandis que leur partie supérieure est fissurée par les eaux. Il en résulte des éboulements incessants : les lames réduisent en fragments les masses tombées, délavent et entraînent dans les grands fonds les particules calcaires, tandis que les rognons de silex qui sont la caractéristique des terrains crayeux, roulés et polis par la mer, s'étendent sur les rivages.

Sur la côte allemande de la mer Baltique, on trouve des falaises basses, argileuses, qui contiennent des cailloux disséminés. L'argile est

délavée comme la craie et il se forme aussi des plages de galets, dont on rencontre une notable à l'ouest de Warnemunde.

Les plages de galets sont souvent caractérisées par plusieurs bourrelets successifs, que produisent les lames suivant leur importance. Dans les tempêtes ces bourrelets disparaissent et se reforment ensuite sous l'action des vagues ordinaires.

On remarque aussi partout que les plus gros échantillons se trouvent à la partie supérieure de la plage ; c'est qu'ils y sont projetés par les violentes lames des ouragans et que les lames de retour n'ont plus la force de les entraîner à la descente.

Plages de sable. — Les sables ont souvent la même origine que les galets ; ils sont le résultat de l'usure des rognons de silex. Ainsi, dit-on, se sont formées en partie les vastes plaines arénacées qui s'étendent depuis la Somme dans la Manche et la mer du Nord.

Nombre de roches, comme les schistes et même le granite, composées d'éléments de faible dimension, se réduisent facilement en sable sous le choc des vagues ; des plages immenses ont été ainsi constituées dans tous les pays du globe. Enfin, souvent les sables des rivages n'ont pas une origine actuelle, mais ont été produits durant les périodes géologiques antérieures. On ne peut expliquer que de cette manière les énormes dépôts accumulés dans certains estuaires. Sur la côte américaine, au sud de New-York, existe un long cordon de sable dont l'origine est certainement très ancienne ; dans le voisinage on ne trouve aucune falaise qui ait pu le produire.

D'une façon générale, les plages sablonneuses sont beaucoup moins abruptes que les plages de galets. Cependant dans le nord de la baie de Valparaiso, les talus sablonneux ont la même inclinaison que les plages de galets les plus accores. La mer y est exceptionnellement profonde.

Dans les estuaires de nombreux fleuves, comme la Seine, la Ribble, existent d'immenses bancs de sable, qui se déplacent au moins en partie sous l'action des diverses forces en jeu. Ces sables sont le plus souvent le résultat de la production des siècles. Sur les côtes d'Angleterre, de Belgique et de Hollande, le sable des plages, celui qui encombre l'embouchure des fleuves, a été regardé comme les débris ultimes des terrains qui unissaient jadis la France à la Grande-Bretagne.

Le fond de la mer est aussi tapissé de sables anciens, que les vagues ramènent au rivage dans certaines conditions. Ainsi à Punta Parra, dans la baie de Talcahuano, existait une petite plage de sable quartzeux spécial à gros grains, qui ne se rencontrait nulle part ailleurs, mais le fond de la baie, devant la pointe, en était composé. Le volume du dépôt était de 2 000 mètres cubes. On l'exploita pour la construction d'un bassin de radoub et l'on en tira plus de 20 000 mètres cubes, sans que la plage parût s'appauvrir. A la baie de Nigg, à un kilomètre au sud d'Aberdeen, on a de même extrait du sable pendant plusieurs années; la mer en rapportait toujours un cube équivalent.

Côtes madréporiques. — Dans les mers tropicales, les zoophytes élèvent parfois, à une distance de la terre qui peut atteindre plusieurs kilomètres, une ceinture de récifs autour du rivage. Ces animaux ne pouvant vivre dans l'eau de mer mélangée d'eau douce, même accidentellement, il en résulte vis-à-vis des fleuves et des torrents des passes naturelles qui permettent l'accès des bassins intérieurs aux récifs. Lorsque ces passes sont larges, les zoophytes envahissent les bassins d'une façon continue; si le renouvellement de l'eau est difficile, les petits animaux ne sont pas à redouter et l'on peut établir dans les bassins abrités des refuges pour les navires. C'est ainsi qu'a été créée Nouméa, ainsi qu'a été creusé le port de Saint-Pierre à la Réunion.

On sait enfin que les atolls de l'Océanie sont l'œuvre exclusive des zoophytes.

Lagunes. — Le long des côtes, surtout de celles où la marée est peu sensible, il se forme, le plus souvent devant les baies concaves, des cordons littoraux situés à une certaine distance du rivage et qui délimitent entre eux et la terre des lagunes parfois complètement isolées, d'autres fois communiquant avec l'océan par une passe. Cette passe n'existe que s'il y a entre la mer et la lagune un courant capable de balayer les alluvions qui tendraient à s'y déposer.

Parmi ces lagunes, les plus intéressantes sont celles qui jouent un rôle dans l'existence de ports, comme le *Frische Haff*, les *Grosse* et *Kleine Haff* de Stettin dans la Baltique et la lagune de Venise.

Dans le Frische Haff (*Haff* signifie lagune) débouchent le Nogat, bras de la Vistule, le Pregel et divers autres petits fleuves. L'embouchure est près du port de Pillau. En 1843, on la prolongea par deux

môles qui eurent pour résultat de creuser la passe de 4,70 *m* à 5,30*m* en 12 ans. En 1855, les levées de la rive droite de la Vistule s'étant rompues sous l'effort des glaces, tout le débit de ce fleuve se porta sur le Nogat, et la passe de Pillau fut creusée à 7,80 *m*. Les choses ayant été rétablies dans leur état primitif, les profondeurs acquises ont été en diminuant.

Les Grosse et Kleine Haff (Grande et Petite Lagune) se trouvent à l'embouchure de l'Oder; leur communication principale avec la mer se fait par la Swine, mais une partie des eaux s'écoule par les deux petites passes de Peene et Dievenow. Sous l'influence des vents, il se produit parfois devant l'embouchure de la Swine des dénivellations de plus de 2 mètres, qui déterminent dans le chenal — dont la largeur de 300 mètres a été délimitée par 2 môles devant Swinemunde — des vitesses s'élevant à 2,40 *m*. L'Oder dépose ses alluvions dans la lagune ; et la mer charriant peu d'apports, les profondeurs se maintiennent assez bien dans le chenal, bien qu'il s'y soit déposé un banc (banc de Joachim).

Dunes. — Sur les plages à faible pente, les vagues projettent les sables au loin sur l'estran. Entre deux marées ou pendant le calme qui suit une tempête, le sable émergé a le temps de se sécher ; le vent l'enlève alors aisément. Si le courant aérien se dirige vers la terre, la contrée est peu à peu envahie.

Le moindre obstacle suffit pour arrêter le sable en un mince bourrelet contre lequel s'accumulent les nouveaux apports. Roulant sur le bourrelet, ils s'étalent sur un plan faiblement incliné, et arrivés à la crête, ils se déversent de l'autre côté sous l'angle du talus naturel. Le vent n'étant pas horizontal entraîne encore les particules les plus éloignées du pied du premier bourrelet et va en constituer un autre. Ces billons successifs portent le nom de *dunes* ; elles se rencontrent sur la plupart des grandes plages sablonneuses. Leur hauteur, dans les Landes, atteint jusqu'à 100 mètres.

Brémontier, pour combattre les dunes, créait des contre-dunes, c'est-à-dire des bourrelets dont les talus étaient disposés en sens inverse. La pente accore arrêtait le sable pendant un temps suffisant pour permettre à des plantations de consolider le glacis extérieur. Les dunes étaient alors fixées.

Tout le département des Landes a été ainsi métamorphosé en riches forêts de pins maritimes, dont le bois est employé sur une immense

échelle pour les traverses de chemins de fer. Pendant les premiers temps de la croissance des pins, il est bon de recouvrir le sable de branchages qui abritent et le sol et la plantation.

Sur les côtes de la Méditerranée, on emploie le tamaris, et sur celles des mers du nord un roseau, *l'arundo arenaria*, qui y est désigné sous le nom d'oya.

Nombre d'autres essences servent encore à fixer les sables dans divers pays. En Belgique, on s'est bien trouvé de diverses espèces de pins (pin Sylvestre, pin noir d'Autriche, pin de Corse), des peupliers (peupliers baumier, du Canada, peuplier argenté), des saules (marçault, à bois violet), de l'aulne et du bouleau blanc. Dans les mers de l'Inde, on plante le *Casuarina* qui a également bien réussi à Suez.

CHAPITRE IX

MATÉRIAUX EMPLOYÉS A LA MER

BOIS

Le bois est très employé dans les constructions maritimes ; nombre de jetées des ports de la Manche et de l'Océan sont en charpente ; on édifie aussi en bois des quais intérieurs, des épis, des estacades, des portes d'écluses. Souvent les ouvrages de maçonnerie sont établis sur des pilotis.

Dans l'eau douce, le bois constamment immergé résiste bien aux actions putréfiantes. Il en est tout autrement s'il est alternativement couvert et découvert par le liquide, comme les pièces placées dans les zones d'action de la marée ; elles pourrissent promptement.

Dans l'eau de mer, les bois résisteraient comme dans l'eau douce, n'était la présence des animaux xylophages. Ce sont surtout le *taret* (*Teredo*, dont on connait plusieurs espèces, la plus répandue étant le *T. navalis*) et le *petit ver* ou *pelouse* (*Limnoria terebrans*). Jeunes, ils sont filiformes et pénètrent dans les pièces par la moindre fissure, surtout par les joints et les trous de boulons. Ils s'ouvrent ensuite un chemin de leurs dents puissantes.

Le taret pénètre jusqu'au cœur en s'éloignant de la surface et creuse des séries de canaux ; la pelouse, au contraire, troue d'abord en dentelle la surface et arrive progressivement au centre.

L'attaque est parfois immédiate ; on a trouvé un jeune taret dans du bois immergé depuis huit jours. A Aransas Pass, des pieux de 15 centimètres de diamètre ont été détruits en six semaines ; à Mobile, en cent jours; des estacades ont été rongées en six mois au Havre et en trois ans à Lorient.

Les tarets atteignent de grandes dimensions, jusqu'à 60 *cm* de longueur et leurs trous ont 15 millimètres de diamètre ; mais en

général ils ont seulement de 15 à 20 *cm* de longueur et leurs cavités sont de 10 millimètres. La pelouse ne dépasse guère 6 millimètres de longueur.

La même pièce peut contenir un grand nombre de ces animaux, mais leurs galeries ne se confondent pas et restent séparées par des parois très minces.

Le taret ne vit que dans l'eau claire; les bois enterrés dans la vase ou dans le sable ne sont pas attaqués; nous avons vu, même dans les mers tropicales, des troncs d'arbre ayant séjourné des siècles dans la boue, au fond d'une baie, et présentant encore toute l'apparence de bois verts. Les pieux battus dans le sable restent intacts ; mais leur partie supérieure, si elle se prolonge dans l'eau claire, est rongée.

L'eau douce empêche le développement du taret, et il ne se rencontre pas dans les bassins où la proportion de sel est faible, comme au Tréport. A Saint-Nazaire, où il n'existait pas, on croyait qu'il ne pourrait vivre, pour la même raison ; mais il y a fait son apparition et a rongé les jetées. A Marseille le vieux port, qui reçoit les déjections des savonneries, n'a pas de taret; les bassins nouveaux en sont infestés.

Ces animaux n'attaquent pas également tous les bois ; ceux de France sont tous plus ou moins vite rongés, mais quelques espèces exotiques résistent mieux. Les Anglais placent au premier rang des bois indemnes le *greenheart* (cœur vert, *Nectandra rodiœi*) de Demerara et de la Guyane ; ils estiment aussi le teck (*Tectona grandis*) de l'Inde, le faux acacia (*Robinia pseudo-acacia*), le courbaril (*Hymenœa verrucosa*) et un bois d'Australie, le jarrah (*Eucalyptus marginata*).

Le greenheart a la réputation d'être inattaquable ; il contient une huile qui éloignerait les animaux; mais à défaut d'autre bois, ils s'y installent parfois, tant le taret que la pelouse. On a trouvé celle-ci dans le greenheart à Wick et à Boulogne, où l'on a dû mailleter en 1877 des portes d'écluses construites en 1868 avec cette essence. A Mormugão, sur la côte occidentale de l'Inde, il a été constaté que le greenheart était autant attaqué que le teck et les autres bois durs du pays. Néanmoins, son immunité relative le rend très usuel en Angleterre ; on l'obtient en pièces de 12 mètres de longueur avec une section de 40 *cm* de côté. Il se fend facilement.

Le teck a les mêmes qualités, à un moindre degré, et le même défaut que le greenheart.

Ces bois sont rares, coûteux, et généralement de faible échantillon; aussi a-t-on cherché à préserver les bois ordinaires de l'atteinte des animaux. Un procédé efficace est le *mailletage*, qui consiste à recouvrir la pièce de clous à tête presque contiguë, et que réunit l'oxyde de fer qui ne tarde pas à se former. Comme le taret et la pelouse ne se développent guère au-dessus des basses mers de morte eau, on se contente de mailleter jusqu'à 20 *cm* plus haut.

Dans les joints, les têtes des clous seraient un inconvénient; on emploie alors de fines pointes, longues de 5 *cm*, et dont la tête très réduite pénètre également dans le bois; on les enfonce très rapprochées. Les clous ordinaires du mailletage ont 15 millimètres de longueur; leurs têtes ont un diamètre égal et sont espacées en quinconces en laissant entre elles un intervalle de 3 millimètres.

On a essayé des doublures en métal, mais les animaux jeunes pénètrent facilement par les joints. En Amérique on s'est bien trouvé de glisser jusqu'au sol, autour des pilotis, des tuyaux de grès réunis par un ciment spécial, et de remplir de sable l'espace annulaire entre le pieu et le tuyau.

Des injections diverses ont aussi été tentées, mais sans résultat. Le meilleur procédé, après le mailletage, est le créosotage par les huiles lourdes, employé d'abord en Angleterre par Bethel.

Il a été l'objet de nombreuses expériences dans divers pays, et M. Forestier, après des essais prolongés aux Sables-d'Olonne, est arrivé aux conclusions suivantes :

« Le créosotage paraît être d'une inefficacité incontestable pour préserver les bois de l'attaque des tarets, à la seule condition d'être assez complet pour que toutes les parties qui peuvent être exposées à l'action de ce térébrant soient bien imprégnées de créosote, ce qui paraît exiger l'absorption d'au moins 300 kilogrammes de cette substance par mètre cube de bois.

« Le créosotage semble augmenter l'adhérence des fibres des bois blancs en augmentant leur flexibilité et leur résistance à l'écrasement.

« On peut dès lors, dans la plupart des travaux à la mer, renoncer à l'emploi du bois de chêne, qui devient de plus en plus rare, en lui substituant des bois créosotés qui, sans coûter plus cher, auraient l'avantage de durer beaucoup plus longtemps que les bois les plus durs ».

L'injection s'opérait aux Sables-d'Olonne dans un cylindre en forte tôle

de 13,50 *m* de longueur et de 1,25 *m* de diamètre, fermé par un obturateur. On y introduit les pièces et l'on élève la température à 110° environ au moyen de vapeur circulant dans des tubes intérieurs accolés aux parois. Les pores étant dilatés par la chaleur, on fait le vide, qui enlève les liquides et les gaz contenus dans le bois ; on introduit alors la créosote à 60° sous une pression de 10 atmosphères, pendant un temps qui varie d'une heure à quatre, jusqu'à ce que la quantité de 300 kilogrammes par mètre cube soit absorbée.

En comptant l'huile lourde à 90 francs la tonne, l'injection par mètre cube revient à 34 francs.

Les résultats de la préservation des bois par la créosote ont été contestés et l'on a cité des cas où le procédé a été inefficace. Ces exceptions, dit M. Forestier, ont été reconnues devoir être attribuées : soit à la juxtaposition des pièces injectées avec du bois non préparé dans lequel les larves peuvent prendre assez de force pour pénétrer ensuite dans le bois créosoté, soit à la mauvaise qualité de la créosote employée, soit enfin à la trop faible quantité injectée.

Ainsi, en Angleterre, on se contente en général de la proportion indiquée par Bethel, de 10 livres par pied cube, ou 160 kilogrammes par mètre cube, ce qui n'est que la moitié du poids regardé comme indispensable par M. Forestier. Récemment, à Tampico et à Colombo, on a constaté l'attaque dans des bois qui n'avaient reçu que 200 à 210 kilogrammes par mètre cube.

D'après M. W. Matthews, aucun préservatif ne met à l'abri des ravages du taret dans les mers tropicales. M. Corthell, au contraire, n'a jamais constaté d'attaque à la dose de 240 kilogrammes, même dans les endroits où le térébrant est le plus redoutable.

Un rapport officiel publié en 1879, à la suite d'expériences du colonel Gillmore, aux Etats-Unis, dit à ce sujet : « On peut affirmer que toute espèce de bois, convenablement imprégnée de créosote, résiste pendant de longues années à l'attaque du taret. Le point douteux, c'est de savoir si cette imprégnation résiste à l'action de l'eau de mer. Si la créosote n'est pas diluée et enlevée par l'eau, le bois continuera à résister aux attaques ».

Le taret existe dans toutes les mers ; cependant il n'a guère fait apparition dans la Baltique qu'à Kiel, sans s'y fixer d'ailleurs définitivement.

MÉTAUX

Cuivre et Bronze. — Ces deux métaux se maintiennent bien dans l'eau de mer. Leur qualité est importante ; les sortes inférieures font un mauvais service pour le doublage des navires. M. Lidy, ingénieur des Ponts et Chaussées, a retiré de la rade de Brest une arquebuse en bronze immergée depuis 300 ans et en bon état de conservation.

Fer et Acier. — Le fer est rapidement oxydé par l'eau salée et les mollusques contribuent à cette oxydation. Des objets soumis à des chocs l'oxyde tombe à mesure de sa formation, et la pièce attaquée de nouveau se ronge plus vite. Dans la baie de Valparaiso, le mur du quai est construit avec des vieux rails verticaux jointifs, contreventés, et qui maintiennent de grosses pierres formant le terre-plein. La partie Ouest, établie il y a vingt ans et protégée par la côte voisine, se trouve encore en parfait état. Au contraire, la partie Est, exposée à des lames violentes, ne dure que quelques années et est l'objet de fréquentes réparations. C'est surtout dans la portion située entre les niveaux de haute et basse mer que l'attaque est marquée, ce qui indique bien l'effet du choc.

Le fer, dans l'eau tranquille, est beaucoup moins corrodé. D'après M. Andrews, il perd par an moins de 1/80 de millimètre d'épaisseur, dans des récipients. En pleine mer, M. Shield a constaté une usure annuelle de 1/13 de millimètre, sur une épave ; le même auteur cite des exemples de pièces de fer peu attaquées après dix et vingt années, dans des localités protégées. Il est donc bon de ne pas exposer ce métal aux chocs violents des vagues.

On prévient l'usure du fer en le nettoyant souvent et lui donnant chaque fois plusieurs couches de peinture au minium, si les pièces se découvrent à la marée ; leur visite doit donc être facile. La galvanisation a donné de bons résultats sur les portes d'écluses ; elle consiste à recouvrir la tôle d'une couche de zinc, qui se change rapidement en oxyde, insoluble dans l'eau salée et d'une efficace protection pour le fer.

M. Mallet recommande comme préservatif un goudronnage spécial. Dans un mélange de coaltar et de chaux vive en poudre fine, il immerge la barre chauffée préalablement au rouge sombre, c'est-à-dire vers 350° et bien nettoyée. La dessiccation laisse un vernis très résistant.

Le fer travaillé est plus attaqué que le fer brut ; l'usure se fait toujours à la surface et est aisée à constater.

L'acier résiste mieux que le fer et on le protège de la même façon.

La réunion de pièces de cuivre et de fer développe des actions électriques qui accélèrent l'oxydation.

Fonte. — Au contraire du fer, la fonte est attaquée à l'intérieur ; souvent la surface paraît en bon état, tandis que la pièce est profondément avariée. Le résultat de la décomposition amène un ramollissement de la fonte, qui peut alors être coupée au couteau. Les particules de fer oxydées sont évincées et il reste surtout du graphite, de la silice, etc. Ainsi, d'après M. Lidy, qui a analysé des boulets retirés de la rade de Brest après une période de 100 à 240 ans, un décimètre cube de fonte du poids de 7,20 *kg* qui devait contenir primitivement 6,72 *kg* de fer et 0,48 *kg* de matières étrangères, contenait toujours la même quantité de celles-ci, mais seulement 2,06 *kg* de fer, le reste ayant disparu.

Il est donc indispensable de sonder souvent les pièces de fonte exposées à la mer pour s'assurer de leur conservation ; la fonte doit être dure et compacte, l'attaque étant évidemment proportionnelle à la porosité.

On a constaté, par l'exemple des portes d'écluse, que la fonte continuellement en travail s'altère moins que celle en repos, surtout dans la vase.

La fonte se protège comme le fer.

PIERRES

Certaines pierres ne résistent pas à l'action de la mer.

Il faut rejeter celles qui peuvent être l'objet d'actions chimiques et l'on en a constaté une très accentuée sur des blocs de basalte, à Agde et sur le prolongement des jetées de l'Hérault.

Mais les pierres, même les plus résistantes au *salin*, sont parfois attaquées par des mollusques, les Pholades et Saxicaves.

A Plymouth, les blocs de grès sont dégradés par ces animaux qui y pénètrent jusqu'à 15 centimètres de profondeur et en détruisent peu à peu la surface, d'où la nécessité de rechargements. A Kirkcaldy, tout un mur de quai construit en schiste a ainsi disparu.

Pour les môles et digues, les pierres les plus lourdes doivent être choisies, afin de mieux résister au choc des lames. Le granite, le basalte, la syénite donnent les meilleurs résultats.

Il faut proscrire des parements les pierres gélives. Pour cet emploi, on se sert dans quelques ports de briques grésées, c'est-à-dire surcuites, mais en ayant soin de les préserver des chocs par des chaînes en pierres dures.

Aux môles de la Tees, on a utilisé des blocs de scories de fer provenant de hauts fourneaux et pesant en moyenne 3 tonnes ; ils se brisaient souvent sous l'action des vagues, peut-être pour avoir été jetés à la mer étant encore chauds. On a dû protéger le musoir par des blocs de béton. Le poids spécifique de cette scorie est de 2,80.

Terre glaise. — L'argile employée pour les batardeaux doit être autant que possible imperméable, après avoir été malaxée avec une certaine quantité d'eau. On a avantage à la laisser préalablement exposée à l'air, l'hiver surtout ; la pluie, la neige lui font subir une transformation qui augmente ses qualités plastiques.

Si en la pétrissant avec de l'eau on en forme un cylindre de 25 *cm* de largeur sur 3 *cm* de diamètre qui puisse être tenu par un bout sans se rompre, la ténacité est suffisante. On éprouve l'imperméabilité en laissant de l'eau pendant un ou deux jours dans une cavité pratiquée au milieu d'une masse rendue plastique par le pétrissage.

L'odeur de terre spéciale qu'elle exhale sous le souffle, l'impression onctueuse qu'elle fait éprouver au toucher font également bien reconnaître les qualités de l'argile.

MORTIERS

Les mortiers employés à la mer ont une importance capitale, car de leur durée dépend celle d'ouvrages exécutés à grands frais. Il ne leur suffit pas, comme pour les constructions terrestres, d'être faits avec soin, avec des chaux bien éteintes, du ciment bien cuit, du sable propre. Il faut encore que les éléments qui les composent ne soient pas attaqués par l'eau de mer.

Les anciens se servaient surtout de la pouzzolane des environs de Naples, dans la proportion de deux parties avec une de chaux ; on retrouve aujourd'hui dans la baie de Tunis des blocs construits pour le

port de Carthage. Après 1800 ans, les môles de Civita-Vecchia sont en bon état ; et c'est de cette ville que provient la pouzzolane partout employée dans la Méditerranée.

En 1818, Vicat posa les bases de la fabrication et de l'emploi des mortiers hydrauliques. Il établit que la prise et le durcissement étaient déterminés par la combinaison de la silice et de la chaux.

Il classait les *chaux* suivant leur teneur en argile, c'est-à-dire suivant le rapport de la quantité de silice et d'alumine à celle de l'oxyde de calcium, rapport qu'il appela *indice d'hydraulicité*. Plus l'indice est élevé, plus la chaux est hydraulique. Ainsi la chaux du Teil, qui contient en moyenne 22,40 de silice et 1,80 d'alumine, en tout 24,20 contre 62,65 d'oxyde de calcium, a un indice représenté par $\frac{24,20}{62,65} = 0,38$, très élevé. D'après M. Candlot, l'indice du ciment de Portland employé à la mer doit être au moins de 0,46.

Mortiers dans l'eau de mer. — On a dû renoncer, dans les travaux maritimes, aux chaux ordinaires même hydrauliques, et aux ciments à prise rapide dits ciments romains, dont on a pourtant parfois à se servir pour des ouvrages urgents, mais à la condition de recouvrir ensuite les parties ainsi construites par d'autres plus résistantes.

Dans la Méditerranée, l'usage de la chaux du Teil (Ardèche) est très répandu et donne de bons résultats qui ne se sont pas toujours reproduits dans l'Océan Atlantique.

En Italie et dans le bassin de la Méditerranée, on utilise la pouzzolane de Civita-Vecchia et de Naples, en Hollande le trass provenant d'Andernach dans la vallée du Rhin.

En Angleterre on fait un grand emploi de la chaux de lias bleu, encore préconisée par de nombreux ingénieurs, bien qu'elle ait entraîné des avaries à Hartlepool et à Sunderland. Cette chaux est éteinte longtemps avant son usage.

Les causes de la dégradation des mortiers par l'eau de mer sont multiples et proviennent des matières étrangères. Les sulfures, surtout celui de calcium, se gonflent par absorption d'eau ; il en est de même de la chaux vive, provenant d'une cuisson insuffisante, et du gypse dont la cristallisation lente dérange l'équilibre des molécules déjà prises.

Mais le corps dont la présence est le plus néfaste est la magnésie, et

il est presque impossible de l'éviter car, ou elle préexiste dans le ciment, ou elle provient de la mer. Voici ce que dit à ce sujet M. Lechatelier :

Les sels magnésiens de l'eau de mer dissolvent la chaux pure, en laissant précipiter la magnésie hydratée floconneuse. Un litre d'eau de mer, qui renferme 2 grammes de magnésie, peut dissoudre 2,8 *gr* de chaux. Il semble que la magnésie en se précipitant devrait cristalliser et jouer le même rôle que le carbonate de chaux ; mais vu la faible solubilité de la magnésie, la concentration des eaux de mer en sels magnésiens et celle des eaux d'imbibition du mortier en chaux, la réaction est infiniment trop rapide pour donner ce résultat.

C'est la carbonatation progressive de la chaux qui la protège contre l'action des sels magnésiens. Il ne faut pas chercher ailleurs la cause de la résistance plus ou moins prolongée des ciments à l'action destructrice de la mer.

L'élimination de l'hydrate de chaux serait donc favorable ; l'addition de la pouzzolane permet d'atteindre ce but. Egalement celle des laitiers de hauts fourneaux, silicates de chaux inertes à l'action de l'eau, mais attaquables par l'acide carbonique.

Le meilleur procédé pour activer la carbonatation de la chaux serait de fournir au ciment l'acide carbonique dont la mer contient très peu (50 litres par mètre cube). L'emploi des carbonates alcalins serait trop coûteux ; mais peut être serait-il possible d'utiliser la décomposition de certaines matières organiques par la chaux du ciment, de la sciure de bois, par exemple, soit naturelle, soit transformée en hydrocellulose pour la rendre plus altérable. Les Romains ajoutaient de la paille à leurs mortiers.

Ciment de Portland. — Aujourd'hui, on n'emploie guère dans tous les pays que le ciment dit de Portland, à cause de sa couleur qui rappelle celle de la pierre de cette localité. On le fabrique presque sur tous les points du globe ; en France la production en est à peu près limitée aux usines Vicat, près de Grenoble, aux environs de Boulogne-sur-Mer et près de Mantes.

Le ciment de Portland est le produit de la cuisson, jusqu'à un commencement de vitrification, d'un mélange intime convenablement dosé de calcaire et d'argile. Ces corps peuvent d'ailleurs provenir de matières premières différentes. Tantôt on utilise des marnes suffisamment

argileuses ; tantôt du calcaire presque pur auquel il faut ajouter la quantité nécessaire d'argile.

Le calcaire provient le plus souvent de carrières ; pourtant à Madras on se sert avec succès de coquilles marines. L'argile est parfois de la boue de rivière, qui donne d'excellents résultats.

Avec les précautions voulues, un dosage rigoureux, un mélange parfait, une cuisson rapide à haute température, on peut obtenir du ciment de Portland de presque tous les gisements de calcaire et d'argile. La pâte à cuire doit contenir de 76 à 81 % de calcaire.

Après cuisson, la pâte, qui sort des fours en scories, est moulue. On attache aujourd'hui une grande importance à la finesse de la mouture, qui élève beaucoup les frais de production. On ne tolère guère que 25 % de résidu sur le tamis n° 200 (cinq mille mailles par centimètre carré), 5 % sur le tamis n° 80 de neuf cents mailles et tout doit passer au tamis n° 50 (324 mailles).

La finesse de mouture influe beaucoup sur la résistance du ciment ; le résidu au tamis de 5000 mailles par centimètre carré est presque inerte, car on obtient, paraît-il, la même résistance en employant la quantité totale ou seulement la quantité qui a passé au tamis.

Essais des ciments. — Pour apprécier la qualité du ciment, on lui fait subir diverses épreuves que nous résumons d'après les conclusions de la Commission d'essai des matériaux de construction, constituée par le Ministère des Travaux Publics de France en 1894.

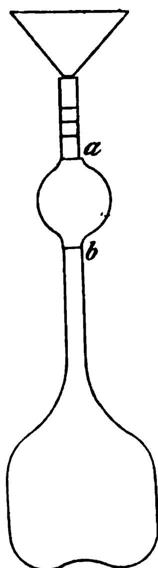


Fig. 34. — Flacon pour la détermination du poids spécifique

Tamisage. — Le tamisage a lieu sur un échantillon de 100 grammes. On le considère comme terminé lorsqu'il passe moins d'un décigramme sous l'action de 25 tours de bras. Il existe une machine à secousses qui élimine rapidement la majeure partie de la fine poussière.

Détermination du poids spécifique. — Elle se fait dans un flacon spécial (fig. 34) terminé par un tube de 20 *cm* de hauteur, présentant un renflement jaugeant 20 cm^3 entre deux traits horizontaux a et b. Au-dessus de a, le tube est gradué en dixièmes de centimètre cube.

On remplit de benzine jusqu'en *b*, puis on introduit 64 grammes environ de ciment en poudre par un entonnoir. Le liquide s'élève au-dessus de *a* ; on lit le volume V en centimètres cubes, et le poids spécifique *d* est donné par l'expression :

$$d = \frac{64}{V}$$

On opère à 15° sur du ciment bien pulvérulent.

Détermination de la densité apparente. — On appelle ainsi le poids du mètre cube.

Elle se détermine dans l'*entonnoir à tamis* (fig. 35), entonnoir vertical dont la section circulaire a comme diamètres 20 millimètres à la base et 150 millimètres à une hauteur de 150 millimètres au-dessus de

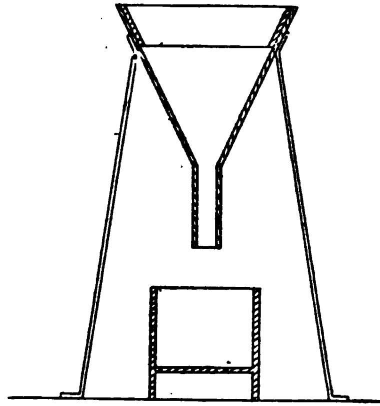


Fig. 35. — Entonnoir à tamis.

la base. A cette hauteur est placée une tôle perforée qu'on trouve dans le commerce et qui compte 1050 trous de 2 millimètres de diamètre par décimètre carré. L'entonnoir se prolonge par un ajutage cylindrique de 20 millimètres de diamètre et 100 millimètres de hauteur. Le tout est supporté par un trépied.

On place à 50 millimètres au-dessous de l'ajutage une mesure cylindrique d'un litre, ayant 100 millimètres de hauteur. On verse 3 à 400 grammes de ciment sur la tôle perforée et on le force à passer en y promenant une spatule en bois de 4 millimètres de largeur. On arrête quand la mesure est surmontée d'un cône de ciment dont la base touche les bords ; on enlève l'excès en arasant au moyen d'une lame droite, verticale.

On prend pour poids du litre la moyenne de cinq résultats.

ESSAIS DE RÉSISTANCE

On prépare pour ces essais des pâtes de ciment pur et des mortiers normaux.

Confection des pâtes. — On emploie à volonté l'eau douce ou l'eau de mer s'il s'agit de travaux maritimes.

A. **Pâtes de ciment.** — La pâte se confectionne avec 1 kilogramme de ciment, qu'on étale sur une table de marbre en formant une couronne au centre de laquelle on verse d'un seul coup le volume d'eau, déterminé par tâtonnements, nécessaire pour satisfaire aux conditions ci-après. On gâche fortement à la truelle pendant cinq minutes.

Avec une partie de la pâte on emplit immédiatement une boîte métallique à fond plat, tronconique, dont le diamètre inférieur a 80 millimètres, le supérieur 90 et dont la profondeur est de 40 millimètres. On lisse la surface avec la truelle passée sur le bord supérieur du moule, sans tassement ni trépidation.

Au centre de cette masse on fait descendre normalement, avec précaution, sans vitesse, une sonde cylindrique de 10 millimètres de diamètre, pesant 300 grammes, en métal poli, propre et sèche, terminée par une section nette et d'équerre. L'appareil, dit sonde de consistance, est construit de façon à indiquer l'épaisseur de pâte restant sous la sonde. La pâte est normale quand cette épaisseur est de 6 millimètres.

B. **Mortiers normaux.** — On les prépare avec du *sable normal* qu'on est généralement obligé de fabriquer par le broyage de roches quartzeuses, qui doivent donner des grains assez gros, réguliers, et dont les dimensions sont celles indiquées ci-dessous. Celui employé en France provient de la plage de Leucate (Aude) ; son poids spécifique est de 2,62 ; il contient 97,5 de silice insoluble et les grains sont arrondis. On le classe en 3 grosseurs.

N° 1	passé au tamis de	1 *mm*,	retenu par celui de	0,5 *mm*	
N° 2	»	1,5 »	»	1 »	*(sable normal simple)*
N° 3	»	2 »	»	1,5 »	

Un mélange de poids égaux des trois grosseurs s'appelle *sable normal composé*.

Pour les essais de rupture, on fait usage d'un *mortier normal sec*, pour les autres d'un *mortier normal plastique*.

On mélange intimement à sec 250 grammes de ciment et 750 grammes de sable; sur une table de marbre on forme une couronne, au centre de laquelle on verse d'un coup la quantité d'eau voulue, et l'on gâche fortement à la truelle cinq minutes.

Pour le mortier normal sec on emploie le sable normal simple et une quantité d'eau de 45 grammes, augmentée du sixième de celle, déterminée ci-dessus, nécessaire pour amener 1 kilogramme de ciment à l'état de pâte normale de ciment.

Pour le mortier normal plastique on emploie le sable normal composé, avec assez d'eau pour obtenir une consistance plastique du mortier. Celle-ci est réalisée lorsqu'après avoir rempli la boîte tronconique, dérasé et lissé la surface, le mortier ressue légèrement sous l'action de quelques coups de truelle frappés sur les côtés de la boîte.

Essais de prise. — A. *Ciment.* — On opère entre 15° et 18° de température. La boîte tronconique, remplie et dérasée, est immergée dans l'eau; on ne la retire, et rapidement, que pour les épreuves, faites avec l'aiguille de Vicat, cylindrique, lisse, propre, sèche, terminée par une section nette et d'équerre, de 1,13 *mm* de diamètre et 300 grammes de poids.

La prise débute quand l'aiguille, posée sur la surface, ne peut plus pénétrer jusqu'au fond; elle finit quand l'aiguille ne pénètre plus du tout. On compte les durées depuis la mise en contact de l'eau et du ciment.

B. *Mortier.* — La prise finit quand la sonde de consistance chargée de 5 kilogrammes ne pénètre plus.

Essais de rupture par traction. —On se sert de *briquettes normales*, ou éprouvettes en forme de 8, ayant au milieu une section de 5 cm^2 (fig. 36).

Les moules sont placés sur une plaque de marbre, bien propres et fouettés d'un linge gras. On en emplit six d'une même gâchée, avec assez de matière pour qu'elle déborde; on tasse avec le doigt et l'on frappe quelques coups de truelle sur les côtés du moule pour compléter le tassement et faciliter le dégagement des bulles d'air. On dérase et on lisse après que la pâte a pris une consistance suffisante, et l'on conserve les briquettes à l'abri des courants d'air et du soleil.

Pour démouler, on fait glisser les moules sur la plaque, on les desserre et les éloigne des briquettes sans soulever celles-ci, 24 heures après le gâchage; on pèse les briquettes et on les conserve suivant les

cas dans l'air, l'eau douce ou l'eau de mer. L'eau douce a au plus un mètre de profondeur et est renouvelée toutes les semaines; l'eau de

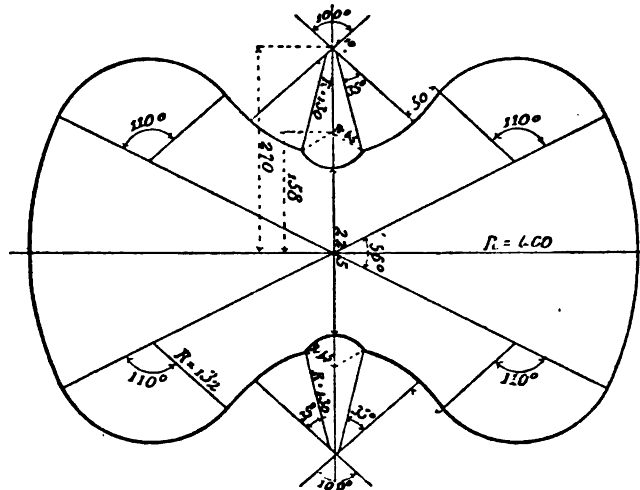


Fig. 36. — Briquette normale.

mer doit avoir un volume quadruple au moins de celui des briquettes, et être renouvelée tous les jours pendant la première semaine, puis toutes les semaines.

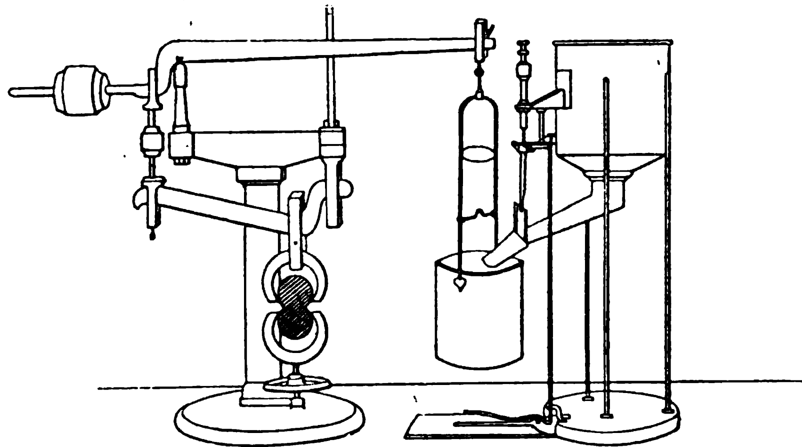


Fig. 37. — Appareil Michaëlis.

L'appareil de rupture généralement employé est celui du docteur Michaëlis (fig. 37). Il se compose d'un système de deux leviers articulés dont le premier porte à l'une de ses extrémités un seau dans lequel on fait écouler de la grenaille de plomb pour produire la charge de rupture,

et le second un étrier auquel est suspendue l'une des griffes qui saisissent la briquette; l'autre griffe se trouve soutenue, et peut être déplacée, à l'aide d'une vis verticale fixée au bâti de l'appareil. L'effort transmis à la briquette correspond à 50 fois le poids introduit dans le seau. La grenaille de plomb est contenue dans une boîte cylindrique, d'où elle s'échappe par un ajutage muni d'une vannette qui se ferme automatiquement au moment de la rupture, par l'effet d'un ressort qu'actionne le seau en s'abaissant brusquement avec le levier qui le porte.

L'effort de traction, continu, doit croître à raison de 5 kilogrammes par seconde.

Les ruptures sont faites après 7 jours, 28 jours, 3 mois, 6 mois, un an, 2 ans à compter du gâchage. On prend la moyenne des résultats fournis par les 6 briquettes.

Pour emplir le moule de mortier sec, on dame celui-ci avec une spatule en fer longue de 35 centimètres, manche compris, présentant une surface de 25 cm^2 de battage et pesant 250 grammes. On procède d'abord par petits coups répétés sur le pourtour de la briquette, puis au centre; on frappe ensuite plus énergiquement et l'on continue le damage jusqu'à ce que la masse commence à prendre un peu d'élasticité et que l'eau sue à la surface. Puis on dérase et on lisse.

Essais de rupture par compression. — Ils ne sont guère usités en France où, à l'occasion, on se sert de la machine Schickert qui rappelle celle de Michaëlis, ou bien d'une presse hydraulique.

Epreuves diverses. — Pour connaître le degré de perméabilité des mortiers et ciments, on scelle sur la face supérieure d'un cube de 70 millimètres de côté un tube en verre de 35 millimètres de diamètre et 110 millimètres de hauteur, où arrive par un tuyau de caoutchouc de l'eau sous pression. On exprime la perméabilité par le débit à l'heure.

Résultats. — Les épreuves ci-dessus énumérées doivent donner les résultats suivants :

Le poids spécifique du ciment de Portland est compris entre 3,05 et 3,175. La densité apparente minima est de 1 250 kilogrammes au mètre cube.

La prise ne doit pas commencer avant une demi-heure et ne pas se terminer avant 3 heures.

La résistance exigée du ciment en France est de :

Après 7 jours 20 *kg*. par cm^2;
» 28 » 35 *kg*. et au moins 5 *kg*. de plus qu'après 7 jours, à moins qu'elle n'atteigne 55 *kg*.;
» 84 » 45 *kg*.; elle doit dépasser la résistance constatée après 28 jours, si celle-ci n'atteint pas 55 *kg*.

L'analyse chimique donne les résultats suivants :

Silice	de 20,30	à	26,10
Alumine	de 5,20	à	10,60
Oxyde de fer. . .	de 2,10	à	5,30
Chaux	de 58,12	à	67,31
Magnésie	de 0,33	à	2,30
Acide sulfurique. .	de 0,26	à	1,78

Le cahier des charges des Ponts et Chaussés refuse tout ciment contenant plus de 1 % d'acide sulfurique ou des sulfures en proportion dosable.

Il regarde comme suspect tout ciment contenant plus de 4 % d'oxyde de fer ou dont l'indice d'hydraulicité est inférieur à 0,44.

La résistance exigée du mortier normal de ciment et de sable (un poids de ciment contre 3 de sable) est par centimètre carré en France :

Après 7 jours 8 *kg*.;
» 28 » 15 » et doit dépasser d'au moins 2 *kg*. celle constatée après 8 jours;
» 84 » 18 » et doit toujours dépasser celle obtenue après 28 jours.

Epreuves à l'eau chaude. — On les a beaucoup préconisées à l'étranger durant ces dernières années; elles peuvent donner d'utiles indications sur la quantité de chaux libre contenue dans le ciment et qui gonfle à une température de 80°; enfin elles déterminent rapidement les réactions entre les éléments; mais ces expériences délicates ne sont pas encore entrées dans la pratique.

D'ailleurs, en général, les essais doivent être faits par des personnes bien au courant et exercées; autrement les résultats obtenus sont des plus contradictoires.

Précautions diverses. — La décomposition du ciment provenant souvent de la chaux libre qui y est contenue, on avait l'habitude autrefois de conserver plusieurs mois le ciment en magasin et même de le remuer pour lui permettre de se carbonater. Avec la finesse de mouture aujourd'hui obtenue, les grains se trouvent mieux en contact avec

l'air et se combinent plus facilement avec l'acide carbonique. Dès lors il est inutile de conserver le ciment trop longtemps et il est même préférable de l'employer après le premier mois de sa fabrication. Les Anglais ont parfois, pour éviter l'éventement, envoyé dans leurs colonies le ciment en scories et le matériel nécessaire pour le pulvériser sur place.

Les ciments et mortiers *gâchés mous* résistent mieux à la mer que ceux gâchés trop secs; la pureté de l'eau est aussi fort importante. La température n'a d'action qu'en retardant la prise si elle est trop froide; mais si l'eau est en excès, elle désagrège les mortiers par sa congélation; aussi l'eau de mer est-elle préférable en hiver surtout.

L'exportation du ciment se fait en barils de 180 kilogrammes.

FABRICATION DES MORTIERS

Sable. — La conservation et la résistance des mortiers dépendent beaucoup de la nature du sable employé. Les sables quartzeux sont préférables; les produits de la décomposition des granites et calcaires siliceux sont bons, et ceux qui proviennent des calcaires durs, comme le marbre, donnent d'excellents mortiers, tandis qu'avec le calcaire tendre, comme la craie, l'altération est rapide. Les sables argileux se décomposent; mais la marne calcaire pulvérulente est d'un bon usage.

Dans les travaux à la mer, il faut proscrire les sables fins qui donnent des mortiers poreux et aisément décomposables; on emploie ou des gros grains (ceux qui restent entre les tamis n° 20 de 75 mailles et n° 30 de 110 mailles), ou mieux encore un mélange de grains gros et fins, ceux-ci entrant pour un tiers.

Lorsque le sable naturel ne remplit pas les conditions voulues, on en fabrique en pulvérisant des pierres dans des broyeurs; ce produit artificiel revient à environ six francs le mètre cube.

Dosage. — Les quantités de sable et de ciment sont normalement en poids, dans le rapport de 3 à 1; mais, suivant les besoins, on emploie des mortiers plus ou moins maigres. Jusqu'à la proportion de 500 kilogrammes par mètre cube de sable, le ciment ne fait que remplir les vides sans augmenter le volume. Comme il importe d'être certain que les grains sont bien réunis, M. Candlot assigne comme minimum pour les travaux à la mer la proportion de 600 kilogrammes de

ciment par mètre cube de sable, et encore à la condition qu'il s'agisse de ciment moulu assez fin pour ne laisser qu'un résidu de 5 % sur le tamis de 900 mailles. Toute quantité supérieure de résidu doit être compensée d'une quantité égale de ciment ; ainsi, un résidu de 20 % exige l'emploi de 720 kilogrammes $(600 + \frac{20 \times 600}{100})$.

Le sable est compté sec. S'il est humide, il pèse moins. L'addition de 2 % d'eau diminue le poids du mètre cube de 270 kilogrammes, soit 18 % du poids primitif ; on fait le dosage en conséquence.

En pratique, pour n'avoir pas à peser le sable, on construit une mesure qui donne le volume du sable correspondant au poids à employer pour un baril de ciment de 180 kilogrammes, et le dosage ainsi opéré est suffisamment exact.

Fabrication du mortier. — Pour de petites quantités, il est fabriqué à la main ; mais pour des quantités importantes, le meilleur système à employer est la meule, qui incorpore parfaitement l'agglomérant au sable.

BÉTON

Dosage. — Le béton, qui joue un si grand rôle dans les constructions maritimes actuelles, se compose d'un mélange de cailloux ou de pierres cassées et de mortier.

Le vide dans un volume de pierres cassées est d'environ la moitié, il est de 2/3 avec des galets ronds. Pour obtenir un mélange compact, il faut donc une partie de mortier pour deux de pierres cassées ou pour deux et demie de galets ; en général, on compte deux parties de mortier pour trois de pierres quelconques, car la forme de celles-ci n'a guère d'importance.

Par économie, on incorpore souvent dans le mélange des moellons dans la proportion de 15 à 20 % ; il faut veiller à ce qu'ils soient distants d'au moins 7 centimètres les uns des autres et de 15 centimètres des parements, auxquels leur plus grande dimension doit être perpendiculaire. L'économie ainsi obtenue s'élève à 15 % environ.

Fabrication. — Pour les travaux importants, la fabrication se fait mécaniquement. En France, on se sert beaucoup du couloir Schlosser,

qui donne de 15 à 20 mètres cubes à l'heure d'excellent béton ; dans les grands chantiers il en existe plusieurs. En Angleterre, le nombre des bétonnières est considérable ; les deux modèles les plus employés sont ceux de MM. Messent et Carey, le premier à production intermittente, le second à fabrication continue. Celui-ci est très rapide .Il se compose d'un cylindre incliné mobile autour d'un axe, mobile aussi, muni de bras et de racloirs ; la vitesse de rotation de l'axe est double de celle du cylindre. Des chaînes dragueuses munies de godets portent tout dosés, l'une le sable, l'autre les cailloux, tandis que le ciment se jette, en proportion voulue, dans une trémie. Les matériaux se réunissent dans une chambre où une vis les entraîne, tout en les mélangeant d'abord à sec, puis avec l'eau. Tout se fait donc automatiquement.

Cette machine a été inventée pour les matériaux du port de Newhaven. L'organisation du chantier est d'une importance considérable, si l'on veut en tirer tout le profit possible; la production peut s'élever à 300 tonnes par heure.

CHAPITRE X

MARCHE DES ALLUVIONS

PLAGES DE GALETS

En France. — Les galets s'étendent en France du Havre jusqu'au Hourdel, à l'embouchure de la Somme. Ils proviennent des falaises crayeuses qui bordent la côte du cap de la Hève au bourg d'Ault, sur une longueur de 230 kilomètres et une hauteur moyenne de 60 mètres. D'après Lamblardie, ces falaises perdraient chaque année une tranche de 30 centimètres, représentant un volume de 4 millions de mètres cubes, estimation qu'on a depuis lors réduite de plus d'un tiers. Au cap de la Hève, l'érosion annuelle emporte en moyenne 1 mètre d'épaisseur et dans une seule tempête, en 1862, une tranche de 15 mètres s'est éboulée. Vers l'an 1100, l'église de Sainte-Adresse s'élevait où gît maintenant le banc de l'Eclat, à 1 kilomètre et demi de la côte ; deux fois déjà l'on a dû reculer les phares de la Hève.

On estime à 15 ou 20 mètres cubes par an la quantité de galets fournis par 100 mètres de longueur de falaises ; il s'en produirait donc de 35 à 45 000 mètres cubes sur la côte normande. A partir du cap d'Antifer, ces matériaux cheminent d'une part vers le nord, d'autre part vers le sud. Ceux-ci allaient jadis jusqu'à la pointe du Hoc dans l'estuaire de la Seine et s'allongeaient sans cesse vers l'amont. Quand furent construites les jetées du Havre, ils pénétraient dans le chenal où ils formaient des pouliers. Aujourd'hui on les enlève pour le lestage au nord de la jetée est et la passe reste libre.

La quantité qui arrive au Havre est évaluée à 14 000 mètres cubes par an.

Le bourg d'Ault, limite septentrionale des falaises, n'est qu'à 10 kilomètres au sud de l'embouchure de la Somme, où s'arrêtent les galets. Quand ceux-ci dans leur marche rencontrent l'entrée des ports

de la Manche qui sont presque à sec pendant la basse mer, ils y trouvent un repos relatif et s'y accumulent. On constate qu'il passe annuellement : à Fécamp 5 000, à Saint-Valery-en-Caux 18 000, à Dieppe 30 000 et au Tréport jusqu'à 40 000 mètres cubes parfois. Le volume s'accroît donc à mesure que l'on s'éloigne du cap d'Antifer.

Il n'en faut pas conclure pourtant que l'augmentation soit le résultat de l'accumulation de toutes les quantités tombées durant le trajet.

Au nord du cap d'Antifer on rencontre la plage d'Etretat, limitée par des falaises dont le pied baigne dans la mer. Les galets qui s'y trouvent proviennent des couches crayeuses locales et restent dans la petite baie, incessamment transportés d'une pointe à l'autre, sans les contourner. Aussi est-ce là, qu'à l'époque où l'on craignait de ne pouvoir lutter contre l'envahissement des galets, Lamblardie avait projeté un port militaire.

A Fécamp, « les mouvements de galet, dit M. Renaud, restent enfermés dans des limites relativement restreintes, par suite de circonstances locales ; et, grâce aux enlèvements faits pour le lestage, la laisse des basses a mers plutôt reculé qu'avancé depuis le prolongement des ouvrages au sud de l'entrée ».

A partir de Fécamp, les galets ne sont arrêtés par aucun obstacle naturel ; mais à Dieppe, on les extrait pour le lest et il n'en passe presque plus devant l'entrée. Il n'en est pas de même au delà et au Tréport on n'entretient dans le chenal une profondeur suffisante que par des chasses.

Jadis au Hourdel, l'amoncellement des galets faisait avancer la pointe de 6 mètres par an ; mais « des épis construits sur le talus arrêtent leur marche d'une manière satisfaisante..... C'est en 1833 que l'on a construit un quai en charpente et une digue en galets, pour abriter la pointe qui n'a plus dès lors sensiblement avancé » (M. Geoffroy).

En Angleterre. — Les principales falaises se rencontrent en Angleterre, de Sidmouth à Lyme Regis dans Lyme Bay à l'ouest de la presqu'île de Portland, puis sur la côte méridionale depuis l'île de Wight jusqu'au delà de Hastings. Elles recommencent près de Folkestone et s'arrêtent à Walmer Castle, vis-à-vis d'Ostende ; on les retrouve encore au nord de Harwich et après Spurn Point qui ferme en partie l'embouchure de l'Humber.

Toutes ces falaises donnent naissance à des plages de galets. Ceux qui proviennent de Lyme Bay s'arrêtent à la presqu'île de Portland ; ceux des falaises à l'ouest d'Hastings vont jusqu'à la pointe de Dungeness ; ceux des falaises suivantes à Shingle End, à quelques kilomètres au delà de Walmer Castle. Tous ces matériaux voyagent de l'ouest à l'est et du sud au nord. C'est le contraire pour les galets d'Harwich et de la rive gauche de l'Humber, qui cheminent du nord au sud et qui s'arrêtent les uns devant Harwich, les autres au Spurn Point. Comme en France, les galets ne dépassent donc guère les dernières falaises dont ils tirent leur origine.

La quantité de matériaux qui se transportent le long des rivages d'Angleterre est plus considérable que de ce côté du détroit. L'usure annuelle à l'ouest de Dungeness est en moyenne de 2 mètres ; elle atteint 4 mètres et davantage près de Cromer sur la côte de Norfolk et dans l'île de Sheppey, où la rive a perdu 1 300 mètres en 320 ans. A Shoreham, pour maintenir libre l'entrée du port sans l'approfondir, il faut enlever par an 120 000 tonnes de galets. Un grand épi construit à Hastings a longtemps arrêté la marche des matériaux et permis de calculer l'apport annuel de 60 000 tonnes.

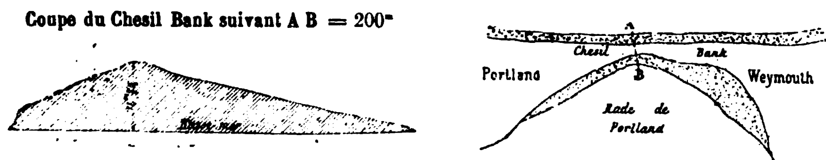


Fig. 38. — Plan et coupe du Chesil Bank.

Chesil Bank (fig. 38). — La plus vaste agglomération de galets qui existe en Angleterre est celle du Chesil Bank, qui s'étend le long de la côte méridionale sur une longueur de 17 kilom. entre Abbotsbury et l'île de Portland qu'elle a réunie à la terre, la transformant en presqu'île et fermant la rade à l'ouest. Sur certains points, le cordon de galets atteint une hauteur de 13 mètres. Sir John Coode, qui en a fait une étude très détaillée, admettait que tous les matériaux venaient de l'ouest ; mais il se présente là un fait singulier : les plus gros échantillons se trouvent près de Portland, c'est-à-dire dans la partie la plus éloignée de la source présumée. On conçoit cependant que les rognons doivent s'user en proportion de la distance parcourue et c'est ce qu'on observe sur les autres plages. Coode affirmait, au contraire, que les plus

grosses pierres présentant plus de prise aux vagues devaient voyager plus loin.

Le célèbre géologue Preswitch attribue l'origine des galets du Chesil Bank à un ancien banc situé dans la presqu'île elle-même, à Portland Bill. Nous croyons que la vérité se trouve des deux côtés, ainsi qu'on l'expliquera plus loin.

Le Chesil Bank est très mobile. Dans une tempête, le 23 novembre 1852, Coode a constaté que 4 millions et demi de tonnes avaient été déplacées ; cinq jours après, 3 millions et demi de tonnes étaient rapportées. Il est bon de dire que la largeur moyenne du banc est de 160 mètres, et que le déplacement précédent comporte un enlèvement d'une couche de 5 mètres de hauteur sur 50 mètres de largeur.

Dungeness. — On trouve près d'Hastings des plages immenses de galets comme Pevensey, etc. ; tous ces matériaux en marche vont s'arrêter à la pointe de Dungeness, au sud de Douvres, qui se comporte en grand comme celle du Hoc en France. Bien caractéristique, cette triste plage basse, dont la superficie est de 20 000 hectares et qui, par l'apport incessant des galets, s'est allongée de l'an 1617 à nos jours d'environ 1600 mètres, allongement qui représente un accroissement annuel de 6 mètres, produit par 80 000 mètres cubes de galets. La moyenne d'augmentation a d'ailleurs diminué de moitié dans les 40 dernières années et décroîtra encore dans l'avenir, les pierres se déposant dans l'eau de plus en plus profonde. Ici, au contraire de ce qui se passe pour la Hève, c'est pour le rapprocher de la mer qu'il a fallu déplacer le phare qui signale la pointe.

Envahissement des galets. — On estime à 10 millions de mètres cubes le volume des déblais qui des rives anglaises et françaises tombent annuellement dans la Manche ; ces énormes volumes semblent bien menaçants pour les ports situés sur les plages où ils cheminent ; pourtant le galet est beaucoup moins redoutable qu'il ne le paraît. Il est assurément gênant, mais ne compromet pas l'existence des ports établis sur ses plages. On vient toujours à bout de s'en rendre maître. On a vu qu'à Fécamp, au Hourdel, des travaux peu importants en ont arrêté la marche. Il en a été de même à Harwich, dont l'ingénieur M. Bruff disait en 1884 : « A Harwich il y a une énorme accumulation de galets et l'on craignait que le port n'en fût bouché ; mais nous l'avons

arrêté au moyen de quelques travaux. On a ainsi maintenu plusieurs millions de tonnes qui autrement seraient entrées dans le port. Depuis que ces travaux ont été exécutés, nous n'avons jamais eu recours au dragage et l'entrée s'est creusée. »

Le môle de Folkestone arrête les galets à l'ouest de ce port et la plage de l'est a dû être protégée contre l'érosion. Il en a été de même à Hove par suite des travaux de Shoreham, et à l'ouest de Newhaven à cause de l'établissement du môle de protection construit en 1886.

De simples obstacles naturels déterminent également l'arrêt de la masse voyageuse ; ainsi un éboulement survenu en 1843 au Round Down pendant la construction du chemin de fer de Folkestone a longtemps protégé les abords de Douvres contre l'envahissement.

La Réunion. — Nous avons eu l'occasion, en 1877, de faire des observations sur la marche des gros matériaux à l'île de la Réunion, dans la mer des Indes. Sur une grande partie de son littoral, cette île présente une large ceinture de pierres arrondies, improprement nommées galets, qui marchent de l'est à l'ouest et l'on a toujours craint d'établir un port sur cette portion des côtes, à cause de l'envahissement de ces matériaux.

Ils sont basaltiques, beaucoup plus gros que ceux des côtes de France et proviennent des torrents qui entraînent à la mer des blocs anguleux qu'arrondit le frottement pendant leur marche. Il est facile d'en suivre la transformation et de constater les faits suivants :

Les obstacles, même peu prononcés, suffisent pour arrêter le transport de ces pierres.

A 300 mètres au plus de l'embouchure des rivières, les blocs anguleux sont totalement transformés en pierres arrondies, ce qui prouve ou une usure très rapide, ou plutôt, comme toutes les autres observations le démontrent, une marche très lente.

L'apport annuel n'est que de quelques milliers de mètres cubes.

Une Commission présidée par l'amiral Byam-Martin, chargée en 1846 d'une enquête sur le port de Douvres, disait :

« Nous n'avons pas perdu de vue que le galet est une des grandes objections que l'on oppose à la création d'un port dans la baie de Douvres ; et les efforts infructueux faits jusqu'à ce jour pour empêcher son entrée dans le port actuel viennent corroborer cette crainte, mais le résultat de notre enquête sur ce sujet est que cette crainte n'est pas bien

fondée, et la majorité des ingénieurs affirme que le mouvement des galets le long d'une côte peut être arrêté quand on le veut. »

Les résultats obtenus depuis la construction du môle de Folkestone ont établi le bien fondé de ces conclusions. Ce n'est que dans des circonstances tout à fait exceptionnelles — que nous ne connaissons pas — que l'existence des galets sur une plage pourrait empêcher l'établissement d'un port.

Arrêt des galets. — La quantité de galets accumulés sur les plages est le résultat des années, car l'usure de ces matériaux, quand ils sont soustraits à l'action de la mer — et c'est le cas de la majeure partie — est très lente. La production annuelle est en France en moyenne de 40 000 mètres cubes ; or, comme l'a fait remarquer Lamblardie, si l'on n'en arrête pas le transport, cette quantité doit arriver justement en une année au terme de son voyage, car autrement les plages s'engraisseraient et protégeraient le pied des falaises qui seraient ainsi soustraites à l'action des vagues. Il y a donc une relation nécessaire entre le débit des plages et l'érosion des falaises.

Quand on arrête la marche des galets, les rivages situés en aval sont privés de leur approvisionnement habituel ; les matériaux qui les composent continuent pourtant à s'écouler ; il en résulte un appauvrissement de la plage, et par conséquent les falaises plus exposées s'écroulent plus rapidement. Au Havre, à Dieppe, à la Réunion, on a dû réglementer l'enlèvement des galets, pour empêcher la destruction des côtes. A Spurn Point, l'extraction de 25000 tonnes avait tellement compromis l'existence du cordon, qu'on a été obligé d'arrêter toute exploitation des matériaux et d'établir des épis de protection.

Nous avons vu ci-dessus que les môles de Newhaven, de Folkestone, avaient arrêté la marche du galet. Cet arrêt est-il définitif ? Peut-on affirmer que tout ouvrage avancé assez loin en mer débarrassera à jamais de tout apport les côtes protégées ? C'est là une question, comme toujours, qui ne peut être résolue que par des considérations locales.

Les galets étant le produit de l'érosion des falaises, leur formation cesserait si le pied de ces côtes accores était soustrait à l'action des vagues.

L'eau, la gelée continueraient leur action, mais les parties éboulées se disposeraient suivant leur talus naturel et n'étant plus enlevées par la mer, soutiendraient les falaises.

Quand un môle arrête les galets, ils engraissent la plage à l'amont, et déterminent de nouvelles laisses AB, A'B'... comme on le voit sur la figure 39. Chaque nouvelle couche se dépose dans l'eau de plus en plus profonde et des laisses équidistantes exigent un temps de plus en plus grand pour se former. L'accrétion finit donc par être assez lente pour qu'il semble que l'arrêt complet est obtenu. Il le sera si, finalement, le nouveau rivage formé s'étend assez loin pour protéger le pied des falaises ; dans le cas contraire, le môle sera débordé après un laps de temps suffisant, à moins qu'on ne procède à l'extraction en amont.

Cependant, si l'obstacle est très avancé, il peut arriver que l'usure des galets soit assez rapide pour que les nouvelles quantités produites ne débordent pas; c'est ce qui arrive à Etretat, à Fécamp, au Chesil Bank. Il ne faut d'ailleurs pas trop compter sur cette aide. Il y a encore dans la marche du galet des particularités peu expliquées. On admet généralement, par exemple, que l'usure en est très rapide, parce que le galet ne s'étend jamais loin de la côte qui l'a produit ; il ne va pas au delà de dix kilomètres de bourg d'Ault ou de Walmer Castle, et cette distance de 10 kilomètres semble être la limite fatidique après laquelle le galet est transformé en sable.

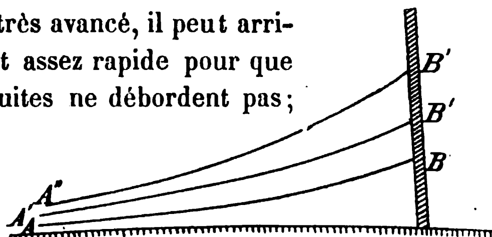


Fig. 39. — Arrêt des galets par un môle.

Pourtant, les 40000 mètres cubes qui se présentent annuellement devant le Tréport proviennent évidemment de fort loin. En comptant qu'un kilomètre de falaise ne produit que 200 mètres cubes de galet, l'apport de 40 000 mètres cubes serait le résultat de l'érosion d'au moins 200 kilomètres de longueur. Si le galet ne va pas au delà du Hourdel et de Shingle End, c'est qu'il y rencontre des conditions spéciale.

En examinant la côte au nord de ces localités, on voit qu'elle change brusquement de sens ; on peut admettre que la direction des lames restant la même n'a plus de composante capable de pousser les galets, qui s'usent sur place. Mais alors, comment se maintient l'énorme approvisionnement du Chesil Bank ? Serait-il moins remué par les vagues ?

En examinant le plan actuel de la plage d'Harwich, qu'a bien voulu nous fournir M. l'ingénieur Th. Miller, on voit que depuis l'arrêt des

galets par l'épi dont il a été question ci-dessus, la plage au nord est détruite par l'érosion (fig. 40). Un faible obstacle a donc suffi pour déterminer un arrêt définitif.

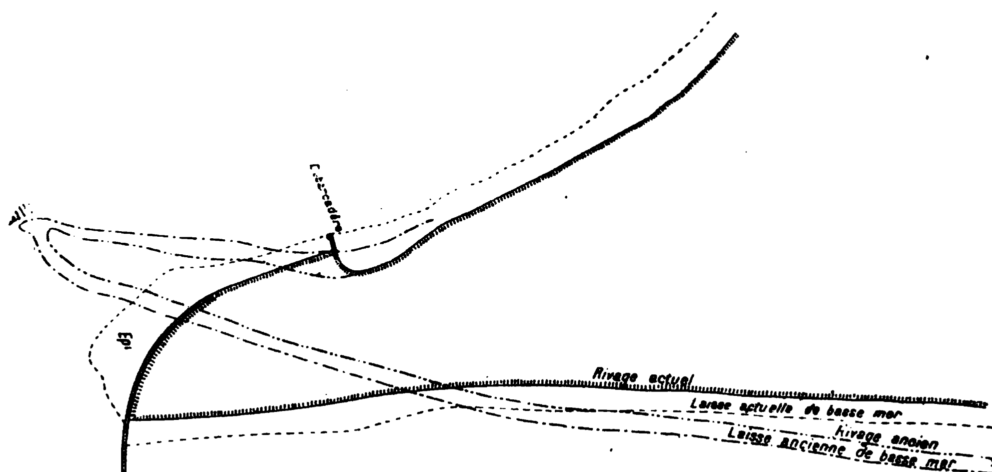


Fig. 40. — Etat actuel de la plage d'Harwich.

PLAGES DE SABLES

Dubuat a donné dans le tableau suivant les vitesses limites au fond d'un cours d'eau, vitesses au-dessous desquelles les matériaux sont entraînés par les courants :

Argile brune propre à la poterie		0,080 *m*
Sable fin		0,160
Gros sable jaune		0,215
Graviers de la Seine	gros comme une graine d'anis	0,108
	» un pois au plus	0,190
	» une petite fève de marais	0,325
Galets de mer arrondis d'un pouce de diamètre au plus		0,650
Pierre à fusil anguleuse du volume d'un œuf de poule		0,975

Le fond d'un cours d'eau est corrodé, d'après Telford, aux vitesses suivantes, en mètres :

Terre détrempée	0,076	Pierres cassées	1,220
Argile tendre	0,152	Cailloux agglomérés, schiste tendre	1,520
Sable	0,305	Rocher en couches	1,830
Gravier	0,610	Rocher dur	3,050
Cailloux	0,915		

Ces vitesses sont un peu plus fortes que celles données par Dubuat ; elles sont également sujettes à des réserves.

D'après M. Sainjon, on a les relations suivantes :

Grosseur des grains en *m*	0,025 - 0,01 - 0,04 - 0,10 - 0,17 - 0,38 - 0,67
Vitesses d'entraînement au fond en *m*	0,25 - 0,50 - 1,00 - 1,50 - 2,00 - 3,00 - 4,00

Les vases, dont la ténuité est extrême, sont entraînées par les plus faibles vitesses et ne se déposent que dans les bassins tranquilles ; il n'est guère de port à l'abri des envasements.

Le sable en suspension est également entraîné par des vitesses minimes. Nous avons été témoin du fait suivant : Au bord de la mer, sur une plage de sable fin, dans une petite flaque d'eau abandonnée par la mer descendante, de quelques mètres carrés de superficie et de 10 centimètres de profondeur, un fort vent déterminait de légères rides. Ces petites vagues, en se brisant contre les rives de la flaque, agitaient le sable qui, à 3 centimètres des bords, avait formé un courant semblable à un ruban délié, flottant à quelques centimètres du fond et se transportant d'un mouvement continu avec une vitesse de 2 centimètres par seconde.

Chaque ride qui passait imprimait au ruban un balancement latéral donnant au mouvement l'apparence serpentine. On avait donc là la reproduction d'un courant littoral en miniature. En interposant un obstacle, on arrêtait la course du ruban et le sable tombait au fond.

M. Graham a constaté l'entraînement par flottaison, *à la surface* d'un cours d'eau animé d'une vitesse de 25 centimètres par seconde, de gros grains de sable réunis en taches et enlevés d'un banc par de petites vagues de la rivière.

Lorsque le sable est tassé au fond d'un cours d'eau, si aucune cause étrangère ne le soulève, il est au contraire difficile à un courant, même assez rapide, de l'entraîner. En tout cas, les mouvements considérables de sable ne sont dus qu'à des vitesses notables ; s'il est assez fin, il est transporté à de grandes distances, sur le littoral ou en pleine mer. Ainsi se forment les bancs sous-marins éloignés de la côte. Ainsi au contraire disparaissent les îles dont les matériaux, usés et réduits en menues particules, sont disséminés dans l'Océan. Telle est l'île de Sable, située dans l'Atlantique en face de la Nouvelle-Ecosse.

Telle encore l'île d'Helgoland, placée à peu de distance de l'embouchure de l'Elbe et du Weser, composée de deux parties séparées par

un bas-fond qui jadis devait émerger et les réunir. L'un des ilots jumeaux est rocheux; les vagues en usent continuellement le rivage; les roches réduites en grains ténus sont transportées sur l'autre ilot, formé de ces sables et connu sous le nom de la Dune, qui se trouve à plus d'un kilomètre de distance. L'ile était jadis beaucoup plus grande, mais a été détruite peu à peu. Comme elle porte deux phares indispensables à la navigation dans ces parages, l'Allemagne a fini par obtenir de l'Angleterre la rétrocession de cette terre en vue de la protéger par des travaux de défense.

En France enfin, on en a un exemple très remarquable dans l'ile de Sein, bien diminuée, et qui ne doit la prolongation de son existence qu'aux digues de protection.

CAUSES DE LA MARCHE DES ALLUVIONS

Galets. — La dimension moyenne des galets est de 4 à 5 centimètres de diamètre ; la vitesse capable de les entraîner serait donc d'un mètre d'après Dubuat. En réalité, elle doit être bien supérieure, car les cailloux enchevêtrés sont difficiles à remuer. Les chasses pratiquées dans nos ports de la Manche et dont la vitesse est considérable parviennent bien à enlever les amas de galets appelés pouliers déposés devant l'entrée, mais nous n'avons jamais constaté l'entraînement de ce genre de matériaux par des courants de la mer.

Marche des galets. — Tous les auteurs s'accordent à reconnaître que les galets ne marchent que sous l'action de la lame. Quand une vague frappe obliquement le rivage, si elle rencontre un galet A (fig. 41) elle le pousse en A'; la lame, se retirant suivant la ligne de plus grande pente, ramène le galet en A'' d'où la suivante le reporte en A''' et ainsi de suite.

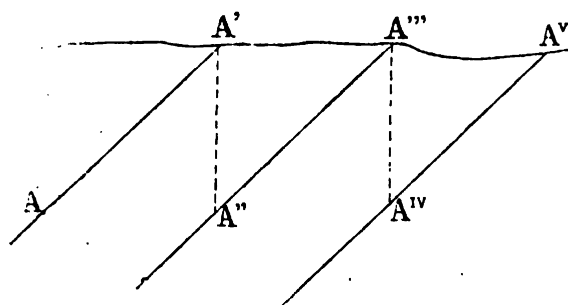


Fig. 41. — Marche des galets.

Le galet chemine par conséquent sur le rivage dans la direction de la vague, en décrivant des zigzags. Par suite, il ne peut marcher dans les grands fonds en dehors de l'atteinte des lames; il se transporte sur l'estran et au-dessous jusqu'à la profondeur où l'énergie de la vague peut le remuer. Sir John Coode a constaté que cette profondeur atteignait jusqu'à 12 mètres devant le Chesil Bank.

Le galet ne s'astreint pas toujours à suivre les découpures du rivage. S'il rencontre une brusque échancrure pas trop profonde ou l'embouchure d'une rivière, il se détache de la côte sous forme d'une flèche qui va rejoindre l'autre bord. Beaucoup de rivières sont ainsi barrées par un cordon de galets. Dans l'estuaire de la Ribble, un bourrelet de 300 à 350 mètres de largeur au sommet se détache de la pointe de Sainte-Anne et s'avance sur 1 300 mètres de longueur; dans la baie de Felixstowe, un cordon court parallèlement à la côte, laissant entre lui et la falaise un espace considérable. Le Chesil Bank lui-même est séparé du rivage par un lac allongé, le *Fleet.*

Les lames ordinaires sont presque impuissantes à faire voyager les galets; on ne voit guère marcher ces matériaux que pendant les gros temps; ainsi 25 000 tonnes déposées en face de Hove, à une distance de 400 mètres du mur de quai, au printemps, n'ont commencé à se déplacer qu'avec les fortes mers de septembre, pour venir s'étaler sur le rivage. Quand les galets sont très gros, ils ne sont transportés que pendant les tempêtes; c'est ce qu'on observe à la Réunion.

Les galets, a-t-on dit, marchent sous l'influence des vagues et par conséquent des vents; il n'y a aucune exception à cette règle, à notre connaissance.

En France, le vent qui frappe le cap d'Antifer vient de l'ouest; la résultante générale à Ingouville vient de l'O.-S.-O; mais vu la violence des tempêtes des vents du quatrième quadrant, il est probable que la résultante, en tenant compte du carré de la vitesse, serait un vent soufflant plutôt de ce quadrant. Dans ce cas, l'une des composantes du vent qui frappe Antifer pousserait les galets vers le nord, l'autre vers le sud. Malheureusement, les observations manquent pour décider la question.

Sur la côte méridionale d'Angleterre, les vents, d'après les observations de Snow Harris, auraient pour résultante un vent du sud, avec une inclinaison d'à peine 5° vers l'est; elle frapperait donc la plage de Portland de l'est vers l'ouest, ce qui donnerait raison à l'opinion de

Prestwich. On comprendrait alors que la majeure partie des galets pourrait venir de l'ouest, poussés par les vents soufflant de cette direction ; mais que les gros galets, rencontrés à l'est, proviendraient du Portland Bill. Sur la côte orientale, la résultante vient du nord-est, abstraction faite des vents de terre.

La pointe de Dungeness est dirigée de l'ouest à l'est: elle est frappée par la résultante presque normalement, avec une très faible inclinaison vers l'est. La côte étant abrupte protège la rive septentrionale et les lames ne peuvent la contourner brusquement; il en résulte que les galets ne doublent pas la pointe et s'y accumulent. On expliquerait de la même façon l'effet des autres pointes qui arrêtent les galets.

MARCHE DES SABLES

Pendant longtemps la marche des sables n'a guère été attribuée qu'à l'action des courants et cette théorie compte encore des partisans. Récemment, aux Etats-Unis et en Angleterre, des ingénieurs distingués ont émis l'opinion que le transport des alluvions, même des galets, est dû seulement au flot de la marée agissant soit par le courant qu'il détermine, soit par de petites vagues émanées de l'onde-marée. En Italie, par réaction contre l'école de Montanari, pour lequel le courant littoral était l'unique véhicule des matériaux qui constituent les rivages et comblent les ports, les ingénieurs actuels n'accordent plus qu'aux vagues seules le pouvoir de modifier la forme des plages.

Rien de plus contraire à la nature des phénomènes maritimes que les généralisations; les théories exclusives exposent à de graves mécomptes. Nous avons vu les sables se déplacer sous l'influence des vagues, nous les avons vu entraînés par les courants généraux, locaux, littoraux ou de marée, suivant les circonstances; une étude spéciale peut seule déterminer la cause des mouvements alluvionnaires le long des côtes.

Examinons chacune des théories. Il est certain que le courant littoral de la Méditerranée, dont la vitesse est de 6 à 9 centimètres par seconde et qui d'ailleurs passe loin des côtes, ne saurait expliquer le transport des grandes masses de sable sous lesquelles ont été comblés les ports antiques d'Anzio, de Terracine, de Fiumicino, et contre lesquelles beaucoup de ports actuels, comme Port-Saïd, ont à lutter. Mais si les vagues seules avaient de l'action sur les sédiments, quelle différence existerait-

il entre les fleuves qui débouchent dans les mers avec ou sans marées? Quelle force permet dans un cas la création des deltas qui s'avancent dans la mer et forme au contraire dans l'autre cas ces estuaires en entonnoir qui sont des deltas renversés? L'influence de la marée se traduit ici par l'action des courants qu'elle engendre.

Le courant de flot est-il, comme on l'a prétendu, l'unique agent du transport des sédiments? La théorie a été émise d'après les phénomènes observés sur les côtes d'Angleterre et sur celle de New-Jersey.

En Angleterre, sur la côte sud, les alluvions marchent de l'ouest à l'est depuis le cap Lizard jusqu'au Pas-de-Calais, du nord au sud sur la côte orientale; or, c'est là la direction du flot. Comme les vents régnants sont ceux du Sud-Ouest, on a été porté à conclure que si la direction de la marche est bien dans la direction du vent sur la côte sud, elle est en sens opposé sur la côte de l'est.

Une objection toute naturelle se présente contre cette théorie du flot agent moteur. Les alluvions se meuvent aussi bien dans les mers sans marée, comme la Baltique, la Méditerrannée, la Mer Noire, la Caspienne; le flot n'est évidemment là pour rien. Mais même dans les mers à marée, il est de nombreux points où les alluvions marchent en sens contraire de la marée.

D'abord en France, sur les rives du Golfe de Gascogne et celles au sud de la Loire, le flot arrive normalement à la côte; ou, s'il a une direction latérale, ce serait plutôt du sud au nord (Etablissements des ports: 3 heures 52 minutes à Socoa et Biarritz et 3 heures 53 minutes au cap Breton); les courants sont faibles et se dirigent dans le même sens, tandis que les sables marchent du nord au sud. On en a la preuve dans la direction des pointes de la rive droite des cours d'eau qui s'écoulent des étangs des Landes dans le Golfe de Gascogne.

Sur la côte continentale de la mer du Nord, les rivières qui débouchent au sud du Zuiderzée voient leurs embouchures se déplacer vers le sud; celles qui débouchent au nord de cette mer sont déviées vers le nord-est, et cependant le flot va toujours du sud au nord.

Au Chili, la marée se propage de l'équateur vers le sud, et sur toute la côte, depuis Lebu, les sables marchent du sud au nord et refoulent devant eux les embouchures des fleuves. Au sud de Lebu, la marche se fait en sens inverse.

Dans la baie de Bengale, pendant la mousson du N.-E. les sables vont du N. au S.; le mouvement est renversé pendant la mousson de S.-O.

Sans doute des observations multipliées feraient constater de semblables faits sur un grand nombre de points.

Pour nous, tout en admettant le transport du sable par les courants, l'agent principal de la marche des alluvions, c'est la vague. Partout on constate que leur direction est celle même de la résultante des vents, abstraction faite de ceux de terre et en tenant compte de leurs vitesses.

Sur la côte orientale d'Angleterre, la résultante vient du N.-E. et explique le transport des sables et galets vers le sud. Elle vient du N.-O. dans le golfe de Gascogne. Elle suit les moussons sur les côtes de l'Inde.

Au Chili, les observations montrent que Lebu est un point neutre; au nord, la résultante vient du S.-O., au sud du N.-O.

Ce sont les vents généraux du N.-O. qui font marcher les alluvions de l'ouest à l'est le long des côtes d'Algérie; sur les rivages provençaux et languedociens, ces vents sont de terre et ce sont ceux du sud-est qui déterminent le mouvement en sens inverse.

On a vu (page 19) que la résultante des vents à Dunkerque vient du N.-O. En est-il de même plus au nord, devant Ostende et sur la côte de Hollande? Aucune observation ne nous l'enseigne, si ce n'est à Cuxhaven où la réponse est affirmative. Il est donc probable que ce régime se maintient sur tout le rivage occidental de la Mer du Nord. Alors, la résultante serait normale à la côte à Ostende, et expliquerait l'importance restreinte du mouvement des sables devant ce port. On comprendrait aussi, rien qu'à voir la direction du rivage au sud et au nord du Zuiderzée, la marche en sens inverse des alluvions sur ces deux portions de la côte, d'après les composantes des vents.

Il est juste d'ajouter que la forme des côtes modifie souvent dans le même sens la marche du flot et la direction des vents, de sorte que les actions semblent se confondre. Il y a là un sujet d'observations qui serait d'un haut intérêt; mais, actuellement, les documents sont difficiles à rassembler (Voir la carte de la page 16).

Formes diverses des pointes de sable. — Lorsque les galets rencontrent une crique, ils la ferment parfois par un cordon littoral; le même phénomène se présente avec le sable. Souvent aussi, le cordon littoral sablonneux se produit sur la ligne où la lame descendante rencontre la lame montante; du choc résulte un dépôt de matériaux, qui s'engraisse peu à peu et finit par devenir un deuxième rivage,

laissant entre lui et la terre un marais. De l'une de ces façons se forment les lagunes. Quand le bourrelet n'est pas encore très élevé, la vague passe par-dessus sa crête et gonfle l'eau du lac intérieur; l'écoulement à marée basse s'opère le plus souvent par une ou deux issues qui plus tard continuent la communication entre la lagune et la mer.

Le cordon littoral qui forme les brisants improprement désignés sous le nom de barres est quelquefois multiple : il est triple sur la côte de Kotonou. On se rend aisément compte de son origine.

Il se forme souvent sur nos côtes, sous l'action de la marée, un petit banc de sable qui laisse entre lui et le rivage un étang où les ondes se propagent lentement, ce qui permet leur facile observation.

La vague après avoir frappé la côte, se réfléchit; si elle en rencontre une autre qui arrive, leur choc produit une gerbe étroite et allongée beaucoup plus élevée que les lames qui l'engendrent; puis les deux ondes se séparent et continuent leur marche en sens inverse, mais la hauteur de chacune d'elles a diminué. Après trois rencontres successives de ce genre, les ondulations disparaissent. C'est le choc de ces lames qui occasionne le dépôt des sables qu'elles entrainent, et par conséquent la formation des cordons.

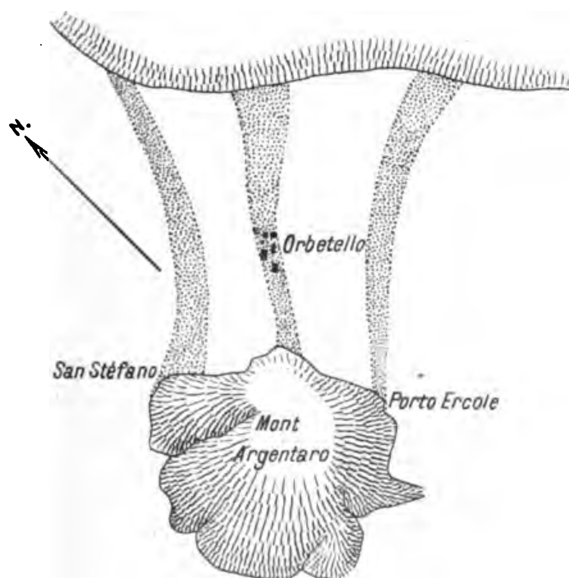


Fig. 42 — Le Mont Argentaro.

Lorsque les vagues contournent des deux côtés une île voisine de la

terre, il arrive que les sables marchent en sens inverse derrière l'île. Ils se rencontrent en un point où il se produit un dépôt, qui augmente peu à peu suivant une normale commune aux rivages de l'île et de la terre et finit par les réunir. C'est un phénomène très fréquent; on rencontre plusieurs de ces isthmes dans la baie de Boston. Parfois, au milieu de ces langues de sable persiste un marais comme celui des Pasquiers, à l'île de Giens, devenue une presqu'île par sa réunion avec la terre; et comme celui d'Orbetello, en Italie, dans l'isthme qui joint le mont Argentaro au continent (fig. 42).

Les flèches sablonneuses qui se détachent de la terre devant une

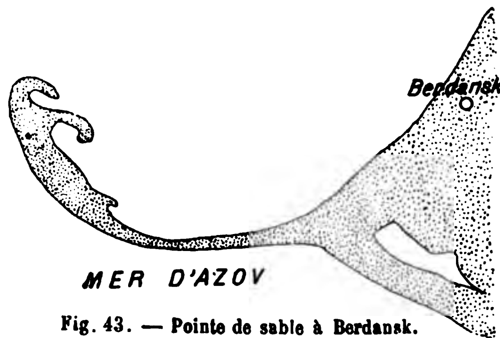


Fig. 43. — Pointe de sable à Berdansk.

crique, un estuaire, prennent parfois de singulières formes; ainsi celle de Berdansk, dans la mer d'Azof (fig. 43).

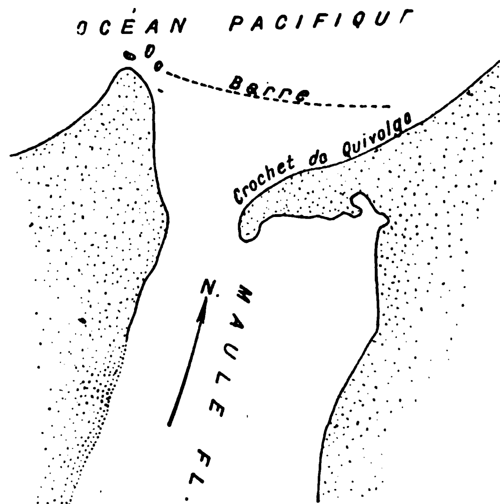


Fig. 44. — Embouchure du Maule.

Nous avons suivi la formation de celle du Maule, dans le Pacifique

(fig. 44). Après une forte crue, le crochet avait été enlevé, et l'embouchure avait la forme représentée par la figure 45. La direction des

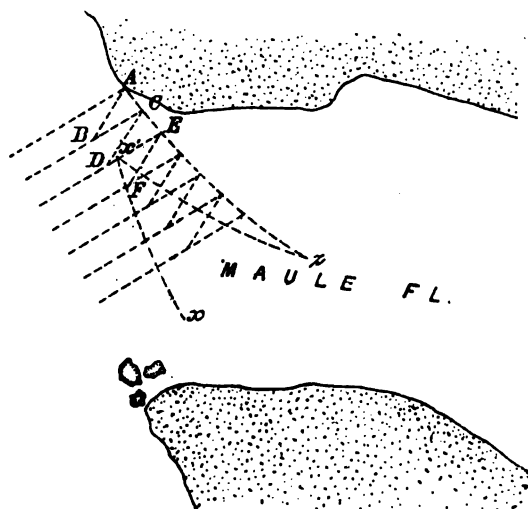


Fig. 45. — Embouchure du Maule après une crue.

lames arrive à la rive sous un angle obtus. Une vague frappant le rivage en A y affouille du sable qu'à son retour elle ramène en B; la lame suivante le porte de B en C; il revient en D et ainsi de suite. Or, la vague montante étant plus forte que la descendante, il en résulte :

1° Qu'une partie du sable s'arrête aux points B, D, F... d'où elle est chassée par la lame suivante :

2° Que les distances AB, CD, EF sont plus courtes que celles BC, DE.... et que par conséquent la ligne ACE... s'incline en crochet vers l'amont.

Il était facile de suivre ce mouvement en jetant en avant de la plage et à une certaine distance du rivage un flotteur x; on le voyait s'avancer en x', puis revenir en z, parce que le courant littoral l'entraînait d'abord, puis que rapproché du rivage par le déferlement des vagues il se trouvait dans la zone d'action de la lame montante et descendante dont il suivait les zigzags.

Supposons deux portions de côtes venant se rejoindre suivant un angle A ouvert vers le large et la résultante générale V des vents bissectrice de cet angle (fig. 46). Le vent qui souffle aux points B et C se réduit en composantes R et R' parallèles au littoral et convergeant vers A. Quelquefois, les matériaux poussés par ces composantes s'accumulent

et la plage BAC finit par devenir rectiligne ; mais parfois aussi c'est le phénomène contraire qui se produit. Si l'apport de sables n'est pas considérable, c'est l'eau qui s'accumule en A et il s'y détermine des tourbillons et un courant de retour qui emportent au large les matières alluvionnaires.

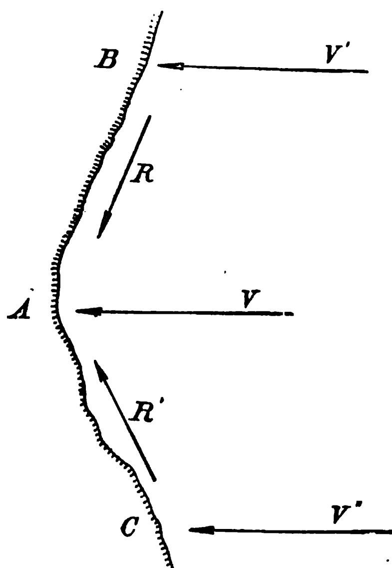


Fig. 46. — Côte à portions formant angle.

La côte elle-même peut être corrodée et la laisse BAC gagne alors sur la terre ; c'est ce qui a lieu sur la côte de Hollande devant Amsterdam, à la baie de Saint-Jean-de-Luz, à la Nouvelle près de Narbonne. Dans les deux premiers cas, la côte est rongée ; dans le troisième, malgré l'afflux du sable des deux parties latérales, le rivage s'est à peine avancé depuis des siècles et les grands fonds se maintiennent.

Le même phénomène peut se produire le long d'un ouvrage artificiel.

Localisation des alluvions. — L'examen minéralogique des matériaux constitutifs des plages indique en général nettement leur origine. Mazzuoli et Cornaglia, par l'étude de la nature lithologique des plages liguriennes, ont démontré que dans la Méditerranée, comme l'avait déjà dit Delesse, le dépôt littoral est essentiellement local. C'est là un fait que nos études nous ont fait reconnaître dans la plupart des mers, car en général, il n'existe pas de courants assez forts pour entraîner au loin les matières ténues.

Le mode d'action des vagues sur les rivages l'explique suffisamment. Pour faire progresser les galets, les gros sables, la lame doit frapper obliquement la côte, du moins dans les conditions expliquées plus haut. Un angle, saillant ou rentrant, suffit pour changer la direction relative de la vague et du rivage, et par conséquent pour arrêter la marche des alluvions.

La côte ligurienne, avec sa grande variété de terrains, était désignée pour jeter un jour particulier sur cette question. On y rencontre successivement les terrains jurassique, crétacé, éocène, des roches primitives, etc. Or sur les plages, entre les pointes successives, on ne trouve que les débris des roches locales.

Les angles rentrants de la côte de Savone et d'Albissola arrêtent également les matériaux, qui ne peuvent les dépasser.



CHAPITRE XI

PROTECTION DES COTES

Les côtes détruites par la mer sont ordinairement d'une valeur trop minime pour qu'on cherche à les protéger ; mais parfois l'érosion est un danger pour une ville, un phare, un point nécessaire. On emploie comme moyen de défense des ouvrages qui peuvent être classés en deux genres : ceux qui sont parallèles à la côte, dits revêtements ou murs de mer, et les épis qui lui sont perpendiculaires.

Revêtements. — La forme la plus simple se compose d'un mur à parement vertical, un véritable quai ; on l'emploie beaucoup en Angleterre pour former des promenades dans les stations balnéaires. Les lames s'y brisent très bien, mais les fondations sont sujettes à l'affouillement ; aussi ne doit-on adopter ce type que sur des terrains résistants.

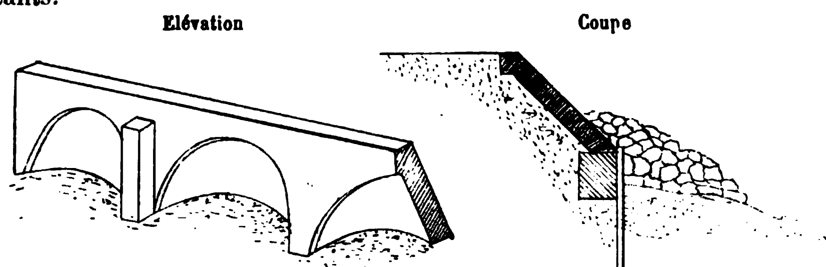


Fig. 47. — Protection près d'Alger.

A la Salpétrière, près d'Alger, M. Hardy a établi un mur, vertical du côté de terre, incliné à 45° vers la mer, et évidé suivant une série de voûtes, pour diminuer le volume de la maçonnerie (fig. 47). La fondation se compose d'un cylindre en béton coulé sous l'eau, retenu par une file de pieux et palplanches qui sont eux-mêmes protégés par un enrochement. Ce revêtement a dû être appuyé en arrière par des contreforts destinés à s'opposer à la poussée.

La forme la plus usitée de revêtement est celle d'un talus incliné, soit

plan, soit composé de courbes convexes ou concaves diversement combinées. La pente doit être très faible, car elle amortit ainsi mieux le choc des vagues. Le revêtement qui protège le phare des Baleines, à l'île de Ré, a une pente de $\frac{1}{5,5}$. Cette faible inclinaison a conduit à une largeur de revêtement de 41 mètres, qu'avec une pente plus forte on aurait pu réduire, ainsi par suite que la dépense. Il faudrait se garder d'une inclinaison trop rapide, qui déterminerait encore plus les affouillements à la base.

A l'île de Ré, une heureuse modification a été apportée à ce genre de défense; deux types ont été construits, l'un à Maisonneuve (fig. 48), l'autre

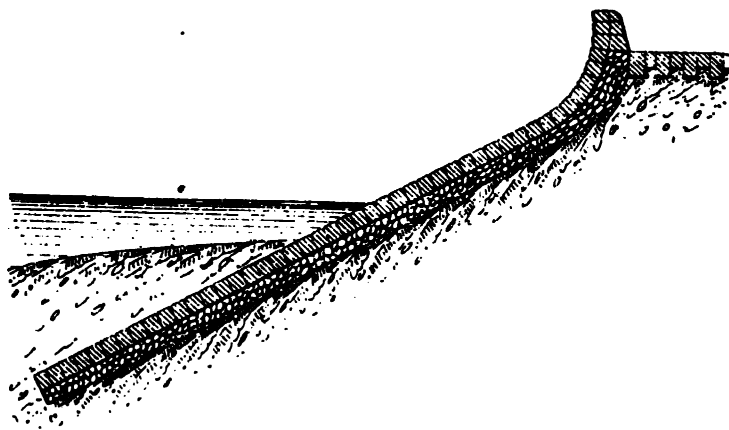


Fig. — 48. — Défense de Maisonneuve

aux Petits-Prés (fig. 49). Le parement du large est incliné à $\frac{1}{2}$, le talus

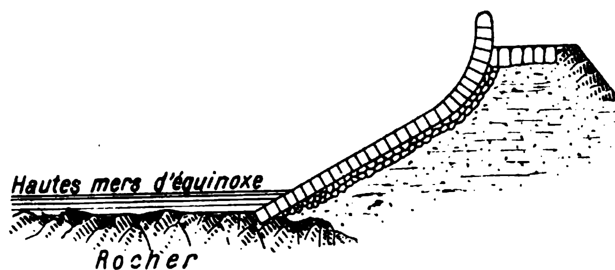


Fig. 49. — Défense des Petits-Prés

à $\frac{1}{3}$; celui-ci est recouvert d'argile et planté de tamaris. La plateforme supérieure, de 2 mètres de largeur, est à 3 mètres au-dessus des plus hautes mers et est encore protégée par un parapet de 60 *cm* qu'on raccorde avec le talus extérieur par une parabole à axe horizontal; on

forme ainsi une volute qui rejette la lame vers la mer, disposition qui permet de réduire la hauteur de l'ouvrage. La lame retombante rencontre celles qui arrivent et ce choc détermine un dépôt de sable qui contribue à la protection de l'ouvrage. Le parement maçonné est en pierres smillées posées au ciment ; au-dessous la maçonnerie est de moellons bruts cimentés recouvrant le sable du rivage.

Ces digues s'étendent sur une longueur de 10 kilomètres ; leur prix est peu élevé et l'entretien ne coûte que 25 à 26 000 francs par an.

A Noirmoutier on n'a pas adopté la partie concave, mais le talus est beaucoup plus raide ; ces profils sont loin de valoir ceux de l'île de Ré.

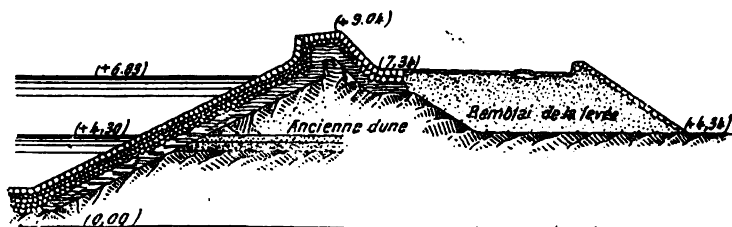


Fig. 50. — Défense de l'Aiguillon.

La figure 50 représente les travaux de défense de la côte de l'Aiguillon, près de Luçon, qui s'étendent sur 5 kilomètres. Ils consistent en un perré maçonné de 70 *cm* d'épaisseur recouvrant un corroi de glaise de 30 *cm*. Le pied, établi à la cote 2,10 *m* où l'estran conserve un niveau invariable, est protégé par une file de pieux et palplanches moisés.

Le Havre. — Une des plus remarquables défenses de côtes est « la digue » Saint-Jean, qui protège le bassin de l'Eure au Havre contre la mer (fig. 51). Elle est fondée à la cote 2,15 *m* sur une couche de béton de 1 à 2 mètres d'épaisseur. Le profil du parement est un arc de cercle de 10,875 *m* de rayon et il est en maçonnerie de briques de 66 *cm* d'épaisseur moyenne. Le parement postérieur, vertical, est aussi en briques avec 45 *cm* d'épaisseur ; il ne monte que jusqu'à la cote 5,93 *m*. La maçonnerie est arasée à la cote 10,15 *m* ; elle est couronnée par un dallage en granite de 50 *cm* de hauteur et 1,20 *m* de largeur, en arrière duquel se trouve un pavage smillé de 1,90 *m* de largeur posé au mortier. L'arête du quai est défendue par un parapet en granite de 70 *cm* de hauteur et 80 *cm* de largeur.

Pour construire le revêtement, on a battu sur le rivage deux lignes

de pieux, à la distance de **7,10** *m* d'axe en axe, les pieux d'une même ligne étant espacés de **1,50** *m*. Ces pieux ont **5** mètres de longueur et **20** *cm* de diamètre. On a déblayé l'intervalle jusqu'à une profondeur variant de **15** à **65** *cm* au-dessous des basses mers et l'on a

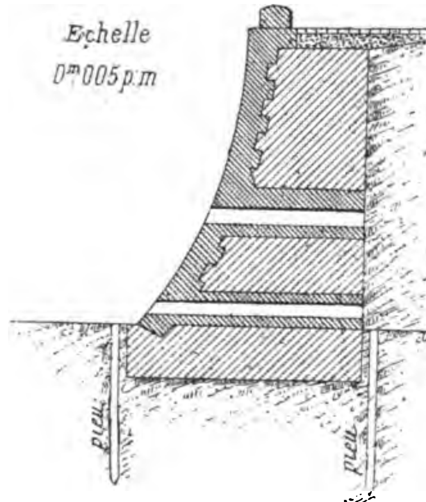


Fig. 51. — Digue Saint-Jean.

rempli la fouille de béton jusqu'à la cote **2,15** *m*. Au-dessus on a élevé la maçonnerie qui, en dehors des parements en briques, est toute en béton.

On a ménagé de **10** mètres en **10** mètres et sur trois rangées des barbacanes de **11** × **35** *cm* en briques ; à l'arrière, on a adossé un mur en pierres sèches pour permettre à l'eau provenant des remblais de s'écouler par ces dalots.

Belgique. — Devant les stations balnéaires de Belgique, on a établi des revêtements ou perrés construits en maçonnerie de briques ou de

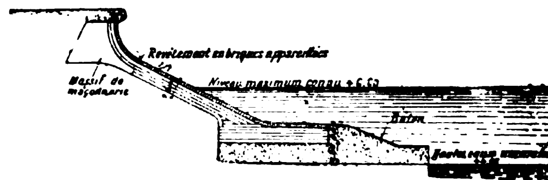


Fig. 52. — Revêtement d'Ostende.

moellons (fig. 52, Ostende). Leur inclinaison est d'environ $\frac{2}{1}$; ils reposent parfois sur un corroi en terre glaise et se terminent en bas par un massif de maçonnerie ou par un bétonnage appuyé sur une

charpente en pieux, ventrières et palplanches. Au sommet existe une tablette en pierre de taille posée sur une assise en maçonnerie.

La partie supérieure est droite ou se recourbe suivant un arc de cercle tangent à la verticale de la crête.

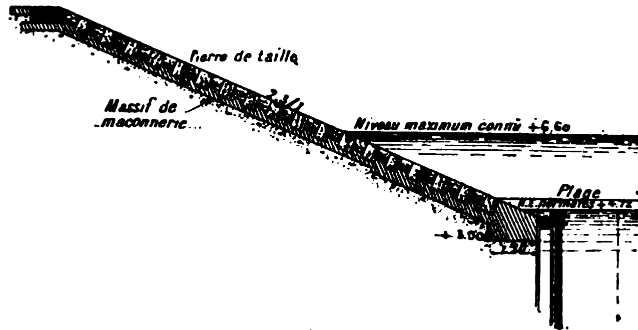


Fig. 53. — Revêtement de Blankenberghe.

Un type très simple est celui de Blankenberghe (fig. 53). Le rivage est cuirassé d'un revêtement en maçonnerie de moellons, avec parement en pierres de taille ou en briques ; la pente varie de $\frac{1}{1,5}$ à $\frac{1}{2,5}$; la base est maintenue par des pieux.

Hollande. — Les Hollandais, dont la côte est si exposée, ont adopté divers types de défenses. La figure 54 représente la protection de l'île

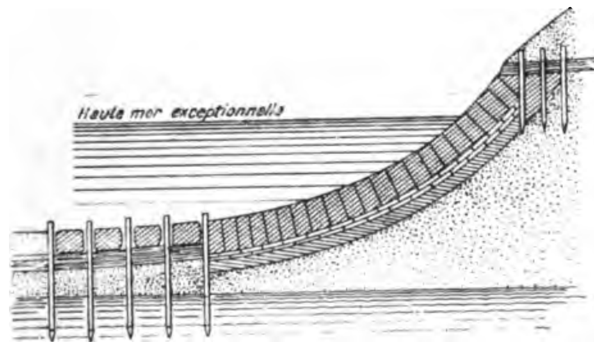


Fig. 54. — Protection de Goedereede.

de Goedereede ; elle ne s'élève pas assez haut pour mettre les dunes à l'abri. A Scheveningen (fig. 55), où il fallait laisser à la plage des bains toute l'étendue possible et élever la promenade, on a établi à la partie inférieure un talus en maçonnerie incliné à $\frac{1}{4}$ retenu par des pilotis. Ce talus parementé en basalte se raccorde avec un mur concave dont le

massif est en béton et la face en pierres de taille. La lame qui s'élève contre le parement courbe est rejetée à la mer.

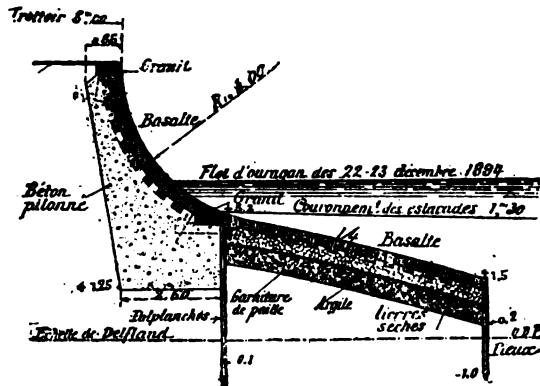


Fig. 55. — Revêtement de Scheveningen.

Allemagne. — Les Allemands ont également plusieurs modes de protection de leurs rivages ; leurs types courbes sont caractérisés par des lignes très arrondies. La figure 56 représente un fascinage recou-

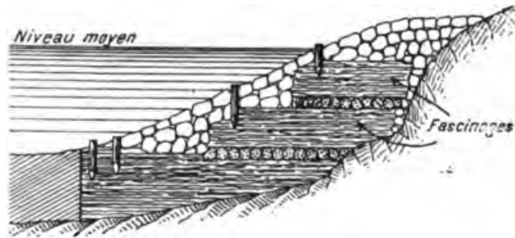


Fig. 56. — Revêtement dans la Baltique.

vert de grosses pierres qui protège dans la Baltique des rives accores ébouleuses. Sur l'île Norderney, on a établi à la base (fig. 57) un fas-

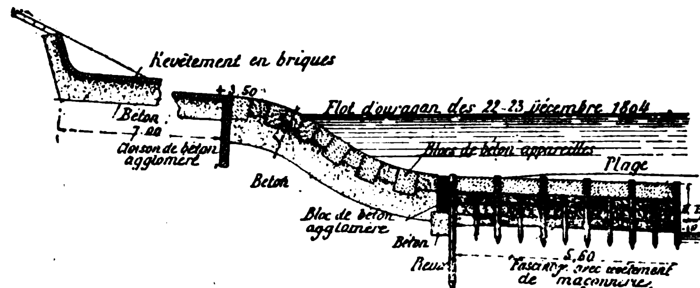


Fig. 57. — Revêtement à Norderney.

cinage avec une cuirasse de maçonnerie ; au-dessus, sur un lit de sable

calcaire est un revêtement successivement concave et convexe, composé de blocs de béton ; puis vient une partie plane presque horizontale, en béton parementé de briques ; malgré son prix élevé, la protection n'est pas complète.

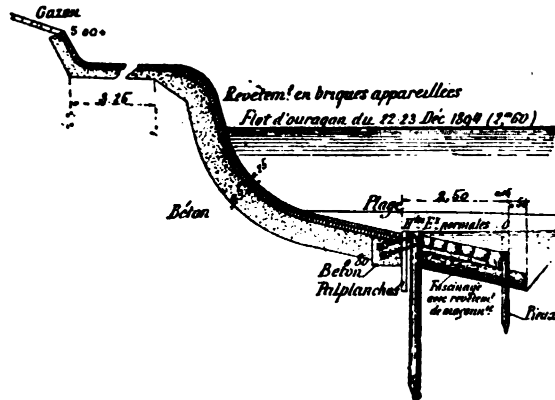


Fig. 58. — Revêtement de Borkum.

Le mur de Borkum (fig. 58) est conçu dans le même genre, mais avec un profil beaucoup plus efficace ; le fascinage inférieur est appuyé par un massif de béton.

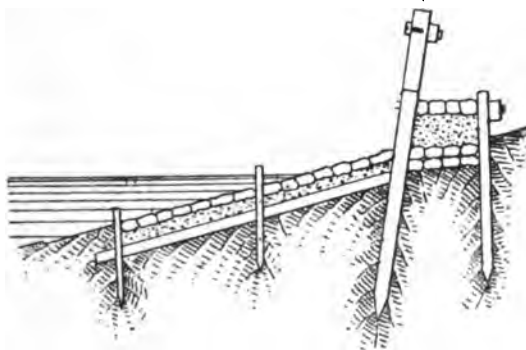


Fig. 59. — Revêtement de Petten.

On a également employé à Borkum et à Petten, en Hollande, la défense indiquée dans la figure 59 et qui se compose d'une palissade oblique, appuyée sur un fascinage tant à son pied que par derrière. On reconnut vite qu'il ne fallait pas poser les pieux jointifs, mais ménager des vides égaux aux pleins ; la résistance a été beaucoup augmentée.

Scarborough. — Un type remarquable mais coûteux est celui qui en Angleterre a servi à Scarborough (fig. 60) en même temps à la protec-

tion du pied des falaises et à la création d'une promenade, sur 1100 mètres de longueur ; le profil est un arc de cercle de 5,20 *m* de rayon ; la hauteur est de 4 mètres au-dessus des hautes eaux. Le mur, fondé sur une couche d'ardoise, a une épaisseur de 1,50 *m* au sommet et 4,60 *m* à la base ; il est construit en béton.

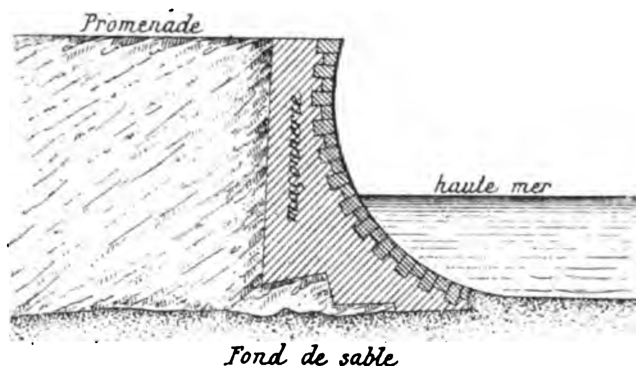


Fig. 60. — Mur de Scarborough.

Le parement est formé de voussoirs en ciment de Portland ; ces blocs, creusés en arrière d'une rainure qui les unit fortement au béton, ont comme dimensions 61 × 15 × 15 *cm* et sont posés en parpaings et boutisses.

Hadeln. — Quelquefois dans tous ces systèmes la lame arrive avec violence jusqu'à la partie supérieure, peut la dépasser et alors occasionne des dégâts sur le terrain protégé. Woltmann a cherché à y remédier, à Cuxhaven et aux marais d'Hadeln à l'embouchure de l'Elbe, en

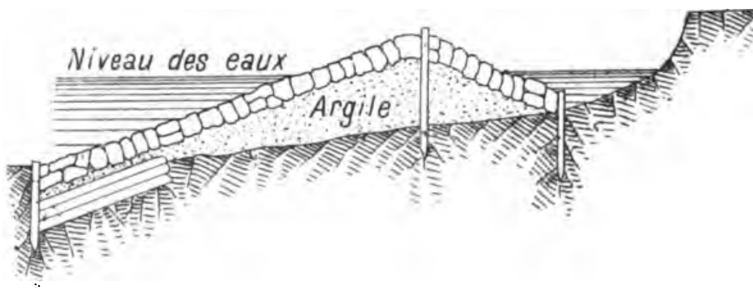


Fig. 61. — Revêtement d'Hadeln

ménageant derrière le revêtement, qui se compose de deux talus adossés, un bassin où retombe la lame ainsi rendue inoffensive (fig. 61). Il est évident que cette disposition ne s'applique qu'à des cas très limités.

Epis. — Les épis sont des obstacles, normaux à la côte, que l'on construit sur les plages où cheminent les sables ou les galets, pour les arrêter, engraisser le rivage et mettre ainsi à l'abri les terres qui le bordent. Ils sont excessivement nombreux sur les côtes de France et d'Angleterre.

Quand les alluvions cheminent toujours dans le même sens, elles s'accolent contre la face d'amont de l'épi et se raccordent avec le rivage par une laisse concave vers la mer ; elles finissent d'ailleurs par déborder l'obstacle et vont s'accumuler dans l'angle du suivant. Dans ce cas on incline souvent l'épi vers l'amont pour retenir le maximum de matériaux. Mais quand les sables et galets oscillent sur la plage au gré des variations du vent, la direction des épis doit être normale.

Leur longueur ne doit pas dépasser celle de l'estran, sur lequel voyagent d'ailleurs surtout les matériaux ; ces ouvrages, en effet, comme les murs de mer, se construisent à marée basse et leur entretien serait très difficile sous l'eau.

Leur hauteur est toujours assez faible ; elle ne dépasse pas un mètre et demi pour le sable, 3 mètres pour le galet ; autrement il faudrait leur donner une résistance beaucoup plus grande que celle qu'ils ont habituellement, excédent qui augmenterait la dépense. La hauteur n'est pas toujours uniforme ; souvent elle diminue de la racine à l'extrémité.

Le volume d'alluvions que les épis peuvent retenir n'est pas considérable, aussi faut-il en augmenter le nombre ; leur distance entre elles est en général égale à leur longueur. Leur enracinement au rivage doit être à l'abri d'une dérivation de la mer par derrière.

Quand un éboulement naturel ou la construction d'un môle arrêtent la marche des alluvions sur une plage, celles d'aval continuant à cheminer le rivage s'amaigrit et les dangers d'érosion augmentent ; on a recours alors aux épis, et il faut en établir simultanément plusieurs pour maintenir les matériaux à leur place. Quand la source des matériaux n'est pas tarie, on commence par les épis d'aval pour que la plage ne soit jamais démunie. Le dernier doit être placé à la limite après laquelle le rivage solide ne peut plus être attaqué, à moins que l'érosion de ces parties d'aval soit sans inconvénient.

A Noirmoutier, on avait complété les revêtements par des épis en pierres sèches, qui remplissaient assez bien leur but dans les conditions normales de la mer ; mais par les gros temps, les plages artificielles déterminées par les épis étaient entraînées dans les parties bas-

ses de l'estran. Les épis dénudés occasionnaient de violents ressacs qui dégradaient le mur de mer.

Souvent aussi, sur les plages de sable, les lames qui débordent les épis retombent en aval et creusent des rigoles qui déchaussent l'ouvrage, qu'on doit alors protéger par des enrochements à son pied.

Galets. — Les épis les plus simples destinés à arrêter les galets consistent en une seule rangée de pieux fichés dans le sol et réunis par des madriers cloués sur la face d'amont ; ils sont plus solides si les madriers se trouvent entre deux rangées alternatives de pieux. On consolide en les appuyant par des contrefiches, d'un seul côté si la marche des alluvions est régulière, des deux côtés dans le cas contraire. Tels sont ceux de la plage ouest de Dieppe, qui sont au nombre de huit, espacés les uns des autres de 105 mètres, sauf les deux plus rapprochés de la jetée, entre lesquels la distance est de 200 mètres; ils descendent jusqu'au pied de l'estran, sur une longueur de 105 mètres et se composent de pieux distants d'un mètre, bordés sur les deux faces et renforcés d'une double ligne d'étais s'appuyant sur deux lignes de pieux réunis deux à deux par des moises et formant des assemblages triangulaires.

Les pieux de ces épis ont 25 × 25 *cm*, les bordages 8 *cm* et les chapeaux qui réunissent les pieux 40 × 25 *cm*.

Outre ces épis de petite dimension, il en existe un grand, à 158 mètres de la jetée de l'ouest, destiné à former un réservoir qui, maintenu d'habitude vide par les extractions opérées pour le lestage, sert à emmagasiner les apports des tempêtes. Il est constitué par un coffrage de section triangulaire, dont l'arête supérieure, horizontale au sommet sur une longueur de 36 mètres, est ensuite inclinée à $\frac{1}{7,5}$ sur une longueur de 75 mètres. Chaque ferme de l'épi comprend un pieu central formant poinçon, deux arbalétriers inclinées à $\frac{1}{2}$ et un entrait-moise porté par deux pieux extérieurs. Les fermes sont distantes de 3 mètres ; des palplanches garnissent l'intervalle des pieux extérieurs des fermes, et un bordage de 10 *cm* d'épaisseur recouvre les arbalétriers qui supportent à leur croisement supérieur un chapeau de forte dimension. Un double cours de moises réunit en outre les pieux et palplanches au pied des arbalétriers ; le coffrage est rempli de galet.

A Grandcamp (Calvados) on avait d'abord établi des épis à bordage jointif, mais l'irrégularité de la marche du galet eut pour résultat leur affouillement des deux côtés. On les remplaça par d'autres composés d'une file de pieux et de palplanches consolidée par un cours de moises et de contrefiches (fig. 62), avec une charpente en claire-voie;

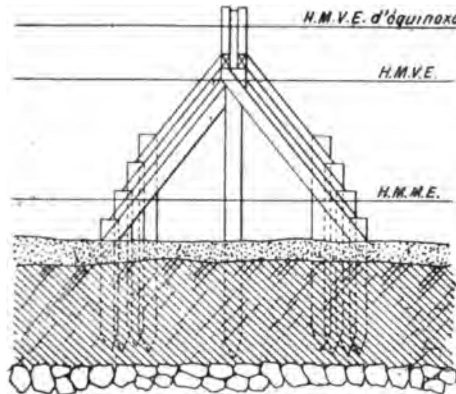


Fig. 62. — Epi de Grandcamp.

les galets s'élevèrent alors à peu près également des deux côtés, la lame étant assez brisée pour n'en faire passer que la moitié à travers la claire-voie.

Des épis sont également placés sur le rivage en Angleterre, surtout comme moyens de protection des plages en arrêtant et fixant le galet. Toute la côte de Brighton, d'Hastings est ainsi protégée. Les épis pleins n'ont pas suffi. Entre eux, on en a disposé à claire-voie. Ils se composent de pieux enfoncés de 3 en 3 mètres, réunis ensemble à une hauteur de 2 mètres par un chapeau en bois. Les intervalles sont garnis par des tiges de fer espacées de 5 *cm*.

Épis d'Harwich. — M. Bruff a bien voulu nous envoyer les plans de l'ouvrage qu'il a opposé à la marche des galets à Harwich (fig. 63).

Harwich est situé sur la mer, à 30 milles au nord de la Tamise, au confluent des rivières Orwell et Stour. Les galets venant du NE avaient dessiné sur la rive gauche de l'embouchure une pointe qui menaçait de l'obstruer. Après la constrution de l'épi courbe *a*, (fig. 63) les galets se sont déposés et ont formé la plage *b*. On a pu alors enlever l'ancien dépôt *c*.

L'épi (fig. 64) en charpente se compose de fermes formées de deux

pieux de **30** *cm* d'équarrissage légèrement inclinés et reliés par des moises et des jambes de force. Les fermes, espacées de **3** mètres, sont réunies par des madriers ; le vide intérieur est rempli d'enrochements.

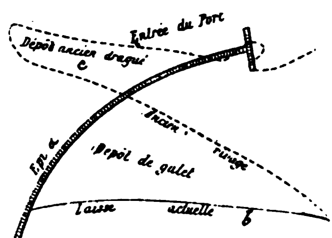


Fig. 63.

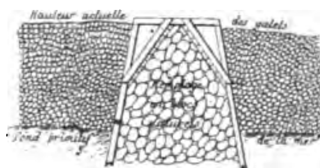


Fig. 64. — Epi d'Harwich.

Le banc de galets, sur certains points, atteint presque le sommet de l'épi, qui est élevé de **6** mètres au-dessus de l'ancien niveau du dépôt.

Epis de Spurn-Point. — Ils sont placés perpendiculairement au rivage, ont de **90** à **105** mètres de longueur et sont espacés de **180** mètres environ. Leur sommet à la racine est à **3,50** *m* au-dessus du niveau de pleine mer de vive eau, et seulement de **1** mètre à **1,25** *m* au-dessus de la plage à leur extrémité.

Les principaux pilotis sont en pin rouge de Dantzig, à la section carrée de **33** *cm* de côté, munis de sabots de fer de **7** kilogrammes. Ils ont été enfoncés de **3,50** *m* dans le substratum d'argile au-dessous du sable. Les fiches n'ont que **3,60** *m* de longueur et ne sont enfoncées que de **2,50** *m*. Entre les pilotis existe un bordage en madriers de **10** *cm* d'épaisseur sur **28** *cm* de largeur, de **6** mètres à **7,50** *m* de longueur, boulonnés sur les pieux.

La plage s'est élevée ; pour opposer à la vague le moins de résistance possible, on ne plaçait les cinq madriers du bordage du sommet que lorsque la hauteur du sable l'exigeait.

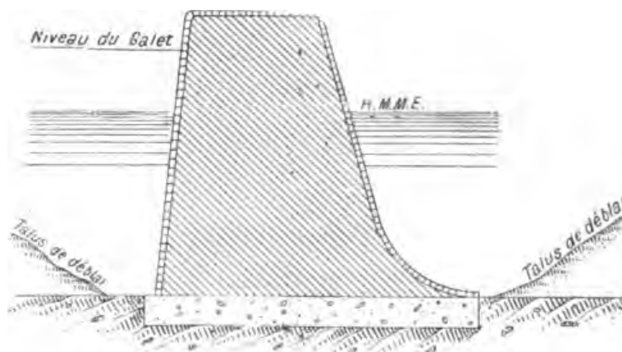


Fig. 65. — Epi des Petites-Dalles.

La durée des épis en charpente ne dépasse guère vingt ans ; aussi en Angleterre en a-t-on établi quelques-uns de plus importants en maçonnerie. En France, on peut citer celui des Petites-Dalles (fig. 65), près de Saint-Valéry en Caux, qui a 50 mètres de longueur.

Sables. — Les épis en charpente déjà décrits n'arrêtent guère les sables; pour maintenir ces alluvions ténues, on emploie souvent deux épis rapprochés, entre lesquels on entasse des pierres, qui ont l'avantage de s'enfoncer dans la plage et de la consolider ; on doit recharger de temps à autre. La figure 66 donne un exemple très simple employé dans la Baltique.

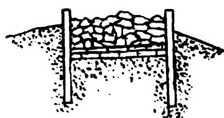


Fig. 66. — Epi dans la Baltique.

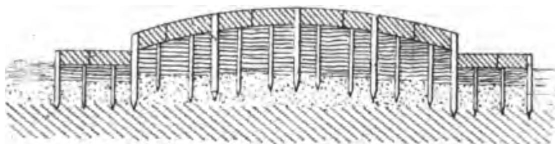


Fig. 67. — Epi de Norderney.

Sur l'île Norderney, on en a établi en fascinages de très compliqués (fig. 67) reliés aux revêtements déjà décrits. Ils atteignent 210 mètres de longueur ; leur largeur est de 5,80 *m* à la racine et de 8,70 *m* à l'extrémité libre qui est très renforcée, comme on doit le faire d'ailleurs. La hauteur diminue depuis l'origine, jusqu'au musoir, élevé seulement de 30 *cm* sur la plage.

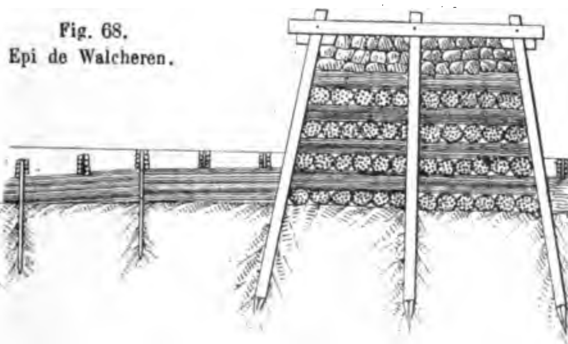


Fig. 68. Epi de Walcheren.

En Hollande, on a même construit à Walcheren les épis représentés par la figure 68. Ce sont des ouvrages dont la dépense est considérable et ne se peut admettre que dans des cas spéciaux. Pour l'exécution de ces fascinages, d'ailleurs, les ouvriers hollandais déploient une habileté consommée qui leur permet de les établir à un taux très réduit.

L'action érosive des lames de tempête se fait énergiquement sentir sur les côtes de Belgique, que depuis plusieurs siècles on a dû protéger par des ouvrages. Ils se composent d'épis de longueurs différentes, qui prennent également leur origine à la partie supérieure de la plage. Ceux qui dépassent la laisse des basses mers de vive eau prennent le nom de jetées; on réserve celui d'épis à ceux qui s'arrêtent à la laisse de mi-marée et qui sont destinés à protéger spécialement le haut de l'estran.

Les premières jetées étaient construites en fascines, mais leur durée limitée et leur entretien difficile les ont fait remplacer successivement par des ouvrages en maçonnerie, dont les figures 69, 70, 71 montrent

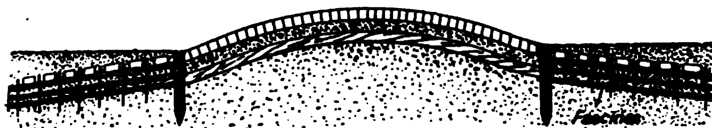


Fig. 69. — Epi sur la côte de Belgique.

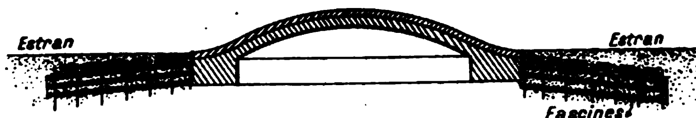


Fig. 70. — Epi sur la côte de Belgique.

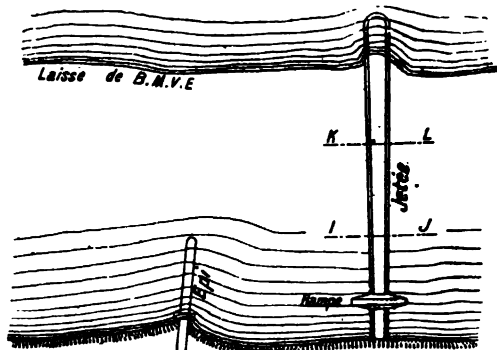


Fig. 71. — Plan d'épis et jetées sur la côte de Belgique.

les coupes et le plan. Ils ont la forme d'une voûte dont l'extrados est prolongé de chaque côté par une surface légèrement concave qui se raccorde avec les bermes de défense, en fascinages lestés de moellons placés dans les cases formées par les pilots.

Protection de Sandy Hook. — Pour préserver de l'érosion le crochet connu sous le nom de Sandy Hook (Crochet de Sable) qui ferme au sud la baie de New-York, on a accumulé parallèlement à la côte, le long de la laisse de haute mer, un cordon d'enrochements dont le poids varie de 150 kilogrammes à 3 tonnes ; la hauteur de ce cordon est de 1,50 *m* et sa section de 4,50 *m* ; il est appuyé de distance en distance, en avant et en arrière, par des épis. Ces épis se sont enterrés par places et ont dû être ramenés à la hauteur primitive ; maintenant ils ont atteint leur limite d'affaissement. Nous rappelons que les vagues ne sont pas très fortes sur le littoral très plat de cette partie de l'Amérique.

Epi de Saint-Augustine, Floride. — Nous citerons encore, comme exemple des épis construits en Amérique pour protéger les plages, celui de Saint-Augustine. Il se compose d'une fondation en fascinages lestée par des enrochements et recouverte de blocs de béton. Le fascinage lesté déborde de chaque côté le revêtement de béton, formé de blocs de 1,50 *m* de long, posés en travers sur la fondation.

On construit depuis quelque temps, en Angleterre, des ouvrages de protection des côtes, d'après un principe nouveau. Il est fondé sur ce fait d'observation — d'après l'auteur M. Case — que les plages ne sont stables que sous un *angle de repos*, une *inclinaison elliptique naturelle*.

La défense consiste en un faible épi de madriers retenus entre deux montants verticaux moisés, enterrés de 30 *cm* seulement dans le sable et maintenus à leur pied par une mince couche de béton. Les madriers eux-mêmes sont enfoncés de quelques centimètres dans une rigole, qu'on referme. Les vagues enterrent l'épi ; on le surélève à mesure, toujours par le même procédé, qui n'exige, on le voit, aucun matériel coûteux. Quand la plage a atteint son talus naturel, elle ne varie plus.

On a ainsi protégé, avec succès paraît-il, le littoral en plusieurs points. A New-Romney, 11 épis de 140 mètres de longueur chacun ont été placés en 12 jours ; à Dymchurch l'une des défenses, de 200 mètres de longueur, a été construite en une seule marée. Cette dernière plage a été engraissée par cent épis de plus de 2 mètres d'épaisseur ; la laisse de basse mer y a reculé de 120 mètres.

CHAPITRE XII

BARRES ET DELTAS

Les fleuves arrachent à la surface des bassins dont ils drainent les eaux une quantité variable de matériaux. En général ceux dont le cours est prolongé dans les régions montagneuses, aux pentes abruptes et aisément affouillables, sont les plus chargés de sédiments. La Seine en charrie très peu ; c'est le contraire pour le Rhône, le Mississipi, dont le débit solide atteint par rapport au débit liquide jusqu'à $\frac{1}{1500}$. L'Humber, la Severn, l'Hoogly, le Fleuve Jaune comptent parmi les fleuves les plus boueux.

Les cours d'eau chargés d'alluvions se comportent différemment suivant la nature de ces matériaux et selon qu'ils se jettent dans des mers sujettes ou non aux marées.

Embouchures dans les mers sans marées. — Les fleuves qui se jettent dans les mers sans marées, n'étant influencés par aucune cause extérieure, arrivent à leur embouchure avec des rives à peu près parallèles. Dans leur lit inférieur — nous mettons à part les torrents — s'établit nécessairement un équilibre tel que les matières charriées ne se déposent pas avant l'arrivée à la mer.

Pour comprendre ce qui se passe à l'embouchure, il faut se rendre compte du mode de transport des alluvions dans les fleuves.

Si elles sont ténues vaseuses, le courant même très faible les tient en suspension. A la mer, elles rencontrent encore assez d'agitation pour ne se déposer que lentement ; la majeure partie est entraînée au large. C'est le cas du Mississipi.

Si les alluvions sont constituées de sable lourd, le transport s'effectue d'autre façon. Quand la vitesse de la rivière est modérée, de 30 à 60 centimètres par seconde, la presque totalité du sable roule sur le

fond, fait facile à constater avec la lunette d'eau et par la filtration qui ne donne guère de résidu. Le lit se compose alors de redans successifs, avec contrepente très douce vers l'amont, et terminés à l'aval par un brusque talus. Il figure un escalier à marches rondes inclinées vers la contre-marche supérieure (fig. 72).

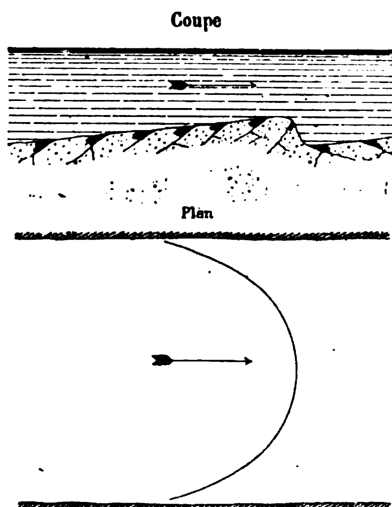


Fig. 72. — Fond d'un cours d'eau.

Ces gradins se forment comme les dunes. Qu'un obstacle arrête un peu de sable, les grains s'accumulent autour du tas primitif et s'étendent vers l'amont en talus allongé ; à cause du frottement, la pente s'établit en sens inverse. Mais quand l'angle du talus devient très faible, le courant roule les matériaux qui tombent en aval du tas, d'où ils continuent leur marche jusqu'à nouvel arrêt.

La vitesse étant supérieure au milieu, les gradins prennent en plan une forme convexe vers l'aval ; les Anglais leur donnent le nom de *vagues (wawes)*.

Quand l'eau de la rivière est trouble, les redans disparaissent. S'il pleuvait du sable au-dessus des dunes, leurs sillons seraient comblés ; de même si la rivière contient en suspension des alluvions qui se déposent verticalement, les marches se confondent. Ces états différents se voient aisément en amont et en aval du confluent d'une rivière trouble avec un fleuve limpide.

Au-dessus d'une certaine vitesse, qu'on peut estimer à 70 centimètres, les redans ne se forment plus ; le courant emporte le sable en le faisant

tourbillonner ; perpétuellement il tombe et sans cesse remonte, mais toujours dans le voisinage du fond.

Quand une rivière se jette dans un lac, elle perd sa vitesse au contact de la nappe d'eau tranquille ; le sable se dépose plus ou moins loin du confluent. Dans la mer, le dépôt est plus rapide. Il résulte en effet d'expériences, faites d'abord aux Etats-Unis par Sidell (1), que l'eau salée se décante quinze fois plus vite que l'eau douce. Bien que d'après M. Fargue, il faille réduire au triple seulement cette proportion, il n'en résulte pas moins que les sédiments tendent à tomber à peine au sortir de l'embouchure.

Une autre raison détermine ce dépôt : l'eau du fleuve ne se mélange pas immédiatement avec la mer ; plus légère, elle s'élève à la surface. Ainsi l'Amazone étend ses flots sur l'Océan à de grandes distances. Devant le Rhône, dans la mer, les ailes de l'hélice d'un vapeur trouent la nappe jaune des eaux surnageantes du fleuve et découvrent en dessous l'onde bleue de la Méditerranée.

En s'élevant, l'eau du fleuve abandonne le sable qu'elle roulait et qui se dépose.

Comme la vitesse est faible, ce dépôt constitue un noyau, autour duquel se développe à l'arrivée du fleuve en mer, un immense gradin, un redan, absolument comme on vient de le voir, avec faible contre pente à l'amont et rapide inclinaison à l'aval. Cette inclinaison devrait être celle du talus naturel du sable ; mais les lames retroussent les couches qui s'éboulent, les appliquent avec violence contre le revers ; leur section devient une cycloïde à point de rebroussement supérieur, analogue à la forme même des vagues, qui les collent pour ainsi dire dans cette position où elles acquièrent une exceptionnelle dureté.

La vitesse du courant étant maxima au centre, les apports y sont plus abondants ; il se forme vis-à-vis de l'embouchure un amoncellement qui, retroussé par les lames, s'élève et domine les autres portions.

En définitive, il se dessine un bourrelet sur lequel on rencontre le minimum de tirant d'eau, les profondeurs étant plus considérables tant à l'amont qu'à l'aval. C'est à ce bourrelet qu'on donne le nom de *barre* ; nous lui réserverons spécialement cette qualification, appliquée souvent à tort aux cordons littoraux.

Deltas. — La barre oppose un obstacle à l'écoulement des eaux du fleuve ; celles-ci se déversent latéralement, des deux côtés si les lames

(1) Annexe de l'ouvrage de Humphrey et Abbott.

se propagent normalement au courant, d'un seul si elles le frappent obliquement et le repoussent. Il se creuse ainsi un ou deux bras nouveaux, où se formeront une nouvelle barre, de nouveaux émissaires plus au large, et ainsi de suite. Telle est l'origine du *delta*, avec la pointe en mer et les côtés sillonnés de lits dont la plupart d'ailleurs se réunissent ou se comblent, de sorte qu'il n'en reste qu'un nombre limité.

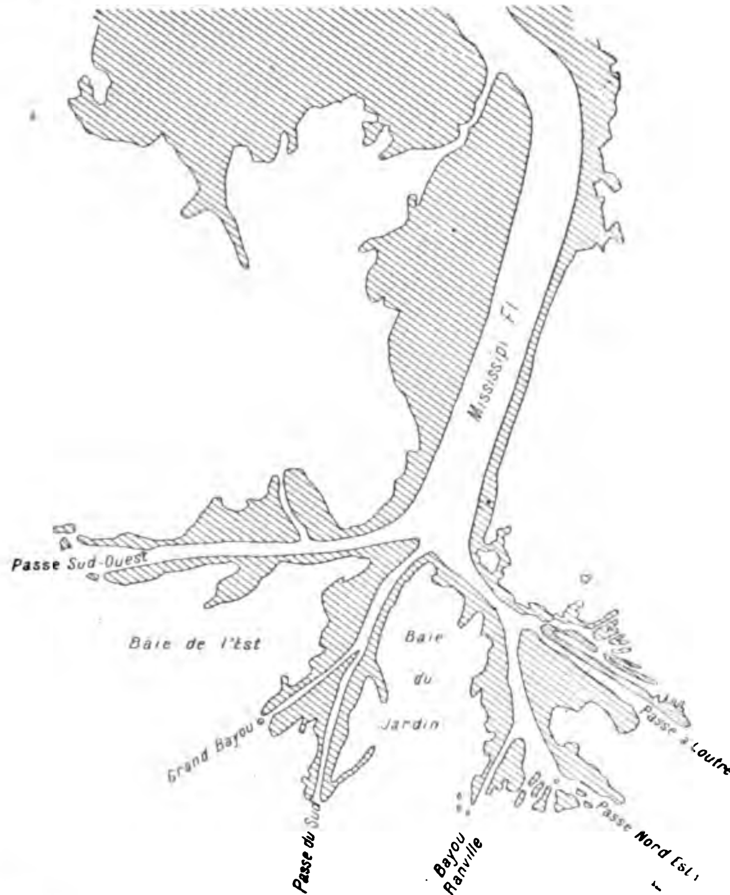


Fig. 73. — Delta du Mississipi

Au Mississipi (fig. 73) les matières étant ténues continuent longtemps leur marche ; la ramification est plus grêle et l'apparence du delta contraste avec la forme ramassée de ceux du Rhône, du Pô, du Nil.

La rapidité d'accroissement des deltas dépend du volume et de la densité des apports fluviaux, de la profondeur et de la salure de la mer, de l'absence plus ou moins complète de courants maritimes, etc.

On a évalué comme suit l'avancement annuel de divers deltas :

Mississipi . . . . Danube (bouche de Kilia)	60 mètres	Nil . . . . . . Rhône . . . . . Pô	40 mètres

Fleuves sans sédiments. — Il est tout à fait erroné de n'attribuer qu'aux apports fluviaux les barres des fleuves qui débouchent dans les mers sans marées. Certains fleuves, avant d'arriver à la mer, traversent des lacs assez étendus pour que leur vitesse s'y amortisse et que les matières charriées s'y déposent ; il sort de ces bassins un courant clair, et pourtant le canal d'évacuation, même arrivant dans une mer sans marée, est barré à son extrémité. C'est le cas de plusieurs fleuves de la Baltique (le Nogat et le Pregel qui se décantent dans le Frische Haff, le Niemen dans le Kurische Haff, l'Oder dans les Stettiner Haffen, la Néva dans le lac Ladoga). Il en était à peu près de même des nombreux petits fleuves comme le Piave, la Brenta, qui se jetaient dans les lagunes de Venise et dont on a détourné le cours.

Des cours d'eau limpides, débouchant dans des mers sans marées, présentent aussi une barre, comme par exemple les ports-canaux de Regi Lagni près de Naples et de Viareggio près de Livourne.

Ces bourrelets ne proviennent donc pas d'apports fluviaux ; leur mode de formation est le même que celui des barres qu'on rencontre à l'embouchure des fleuves débouchant dans les mers sujettes aux marées.

Embouchures dans les mers sujettes aux marées. — L'onde-marée, en remontant un fleuve, y introduit des quantités d'eau dont le volume diminue avec la distance à la mer. Le courant déterminé, tant au flux qu'au reflux, par ces masses d'eau, corrode les berges avec l'intensité voulue pour constituer des sections capables de les contenir et qui, en conséquence, se rétrécissent de l'aval à l'amont. Ainsi se forme cette partie à rives non parallèles écartées vers l'Océan, l'*estuaire*, dont il est d'ailleurs souvent malaisé de déterminer les limites et qui, vu sa forme, a également reçu le nom assez impropre de *delta négatif;* mieux vaudrait peut-être *delta renversé*.

Si la corrosion s'arrête à temps pour que la capacité de l'estuaire soit proportionnée au service hydraulique qu'il remplit, il ne s'y trouve pas de place pour des matériaux excédents ; à chaque reflux, tout au moins en vives eaux, les apports fluviaux sont entraînés vers la mer par la vitesse majorée du mélange d'eau douce et d'eau salée qui s'écoule.

Plus grande est la proportion d'eau de mer par rapport au débit propre du fleuve, plus est accentuée cette majoration et plus assurée l'évacuation des matières.

Mais si par suite de conditions spéciales, le plus souvent géologiques, l'estuaire est trop large, la vitesse du jusant n'y est pas suffisante et le dépôt des matières s'effectue. De plus, il y entre, venant de la mer durant le flot, des sables et des vases dont une partie au moins ne peut plus être entraînée. Le résultat est un estuaire encombré de bancs, au milieu desquels serpentent des chenaux variables.

Indépendamment de ces dépôts, il existe souvent, en dehors de l'embouchure de ces fleuves, une barre semblable à celle précédemment décrite. On a longuement discuté sur l'origine de ces bourrelets, que longtemps on a cru seulement le résultat d'apports fluviaux ou l'effet des courants.

Barre du Maule. — Nous avons assisté à la formation d'une barre, observation peut-être unique dans la science et avons ainsi pu au moins pour ce cas en déterminer la cause.

Le Maule est un fleuve qui débouche sur la côte du Chili, au 35° degré de latitude sud, par un estuaire de 600 mètres de largeur. La mer y marne de 1,50 *m* en moyenne ; la côte est incessamment battue par des vents violents du sud-ouest. Le débit du fleuve à l'étiage est

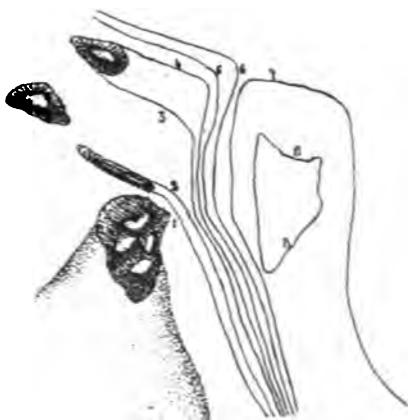


Fig. 74, I. — Maule, 3 décembre 1891.

de 250 mètres cubes ; la marée qui remonte à 12 kilomètres porte à 1200 mètres cubes par seconde le volume écoulé au jusant à l'embouchure.

Le courant ne se renverse jamais dans le fleuve ; à toute période, il se dirige droit vers l'ouest, avec une vitesse maxima de 50 centimètres.

De chaque côté de l'embouchure, dans la mer, existe un courant côtier dirigé vers le Nord ; au Sud il se raccorde avec le courant de l'ouest.

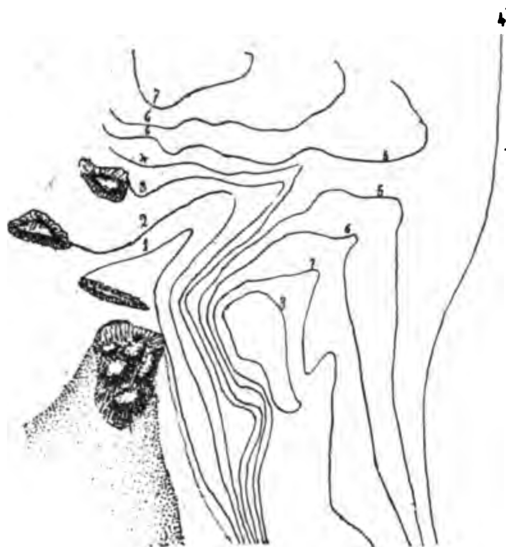


Fig. 74, II. — Maule, 15 janvier 1892.

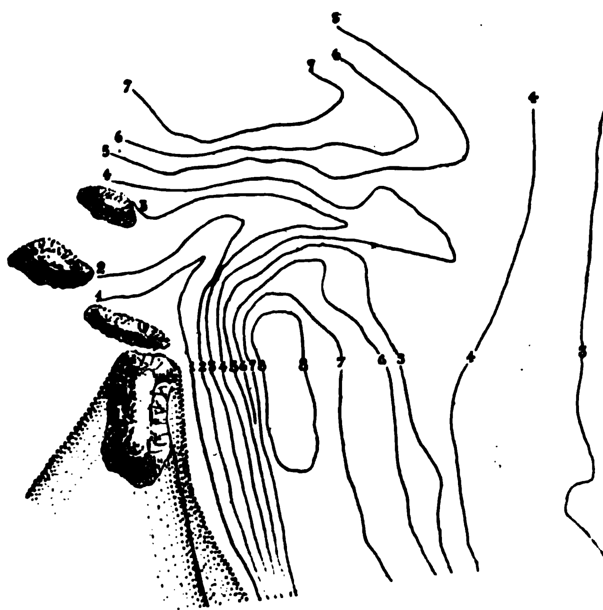


Fig. 74, III. — Maule, 15 février 1892.

L'estuaire, profond de 4 à 6 mètres, n'est pavé que de pierres noyées

dans la vase. Sur les rives, si haut qu'on remonte, on ne trouve que des cailloux. Quelques rares berges abritent de petits bancs de sable très fin, grisâtre, qui lorsque les crues l'emportent est entraîné en pleine mer.

Devant l'embouchure existe une barre puissante sur laquelle le tirant d'eau n'est que de 1,50 *m*. Elle est constituée comme le rivage par un sable noir, à gros grains, surtout au sud. Il n'y a donc aucun doute : ce sable ne provient pas du fleuve, il est le produit de la décomposition des micaschites des falaises de la côte. La différence de grosseur des grains indique qu'il vient du sud.

En octobre 1892, une crue enleva complètement la barre ; là où en temps ordinaire la profondeur était de 1,50 *m*, on sondait 10 mètres, et les plus grands navires pouvaient entrer sans difficulté.

Cet état de choses dura quelques mois ; mais peu à peu la barre se reforma et au bout d'une année elle était complètement rétablie.



Fig. 74, IV. — Maule, 8 mars 1892.

Nous avons réuni (voir les quatre figures 74), les plans des sondages

effectués à diverses époques de la formation de la barre ; il a fallu les cesser quand elle était plus avancée, car les brisants en empêchaient l'approche ; mais la progression de ces brisants montrait la continuation de l'amoncellement dans le même sens. On voit nettement la barre poindre au sud et s'avancer vers le nord. Comme les courants devant l'estuaire sont perpendiculaires à cette direction, il est clair que l'effet n'est pas dû à leur action, mais à celle des vagues.

La formation de la barre n'est que le résultat de la continuation de la marche du sable le long du rivage ; mais le fleuve a sa part dans la situation du bourrelet. Si l'on supprimait le cours d'eau, le rivage se reformerait en réunissant par une portion courbe les plages du nord et du sud ; or, le plan indique que la barre occupe justement la place où dans ce cas se trouverait la courbe de niveau de 1,50 *m*.

Situation des barres. — Ce n'est pas là un hasard, mais bien un fait d'observation fréquente dans les fleuves barrés. Sur une côte, l'existence d'un estuaire — à moins de développement extraordinaire — est un accident d'ordre secondaire, dont l'influence sur les forces en jeu est minime ; la mer tend à conserver son régime naturel. Si la rivière est petite, la barre ferme en entier l'embouchure ; si elle est importante, l'eau douce conserve son domaine et empiète même sur celui de la mer, parce que le courant repousse le barrage, surtout au milieu, à cause de sa vitesse maxima ; d'où la forme fréquente des barres en fer à cheval. Pour que l'eau du jusant se fraye un passage, la barre ne peut s'élever au-delà d'une certaine hauteur ; aussi se place-t-elle en général à l'endroit où le fond aurait ce niveau, en cas de disparition du fleuve.

Le minimum du tirant d'eau sur les barres est d'une constance singulière ; il est presque toujours compris entre 1,50 *m* et 3,50 *m*.

C'est qu'il existe une relation nécessaire entre la largeur et le débit d'un fleuve pour qu'il soit barré. Etroit, il concentrerait assez son courant pour empêcher la formation du bourrelet ; trop large, il serait complètement clos.

Effet des barres. — Une fois la barre formée, les lames se brisent contre l'obstacle et déterminent la marche des alluvions le long du talus extérieur, comme sur le rivage ; les matériaux ne s'accumulent donc pas et la situation du bourrelet sous-marin reste presque invariable. Le courant du fleuve creuse sur la crête un ou plusieurs chenaux, un

peu plus profonds, dont la position change sans cesse, surtout après les gros temps, et les pilotes doivent constamment les baliser. Leur présence est souvent indiquée par la couleur plus foncée de l'eau et par un calme relatif au milieu des brisants.

Sur certaines barres, le passage des bâtiments est facile ; sur d'autres au contraire, il est des plus dangereux, comme sur les fleuves chiliens, le Zambèze, etc.

Deltas dans les mers sujettes à marées. — Les barres marines, au contraire des fluviales, ne modifient guère le plan du littoral. Il existe pourtant des deltas à l'embouchure de certains fleuves qui se jettent dans des mers à marées, tels que l'Iraouaddy (amplitude de la marée : 6 mètres), le Gange dans l'Inde (3,50 *m*), l'Orénoque au Venezuela (1 mètre). Ce sont des fleuves à débit assez puissant pour que l'eau de mer n'y pénètre pas et qui sont chargés d'un volume considérable de sédiments. Bien que le courant soit un peu renforcé au jusant par les eaux qu'a gonflées le flot, il ne s'y détermine pas une vitesse capable d'emporter en mer les matériaux, qui se déposent en barres fluviales. Le débit du fleuve domine la marée et en rend l'effet secondaire. C'est donc la proportion entre le débit du fleuve et l'amplitude de la marée qui est, en général, la cause déterminante de la formation d'une barre fluviale et par suite d'un delta. Il est d'observation assez constante que dans ces fleuves à delta qui débouchent dans les mers sujettes à marées, les embouchures sont en entonnoir, à cause des volumes emmagasinés pendant le flot.

Les bouches du Rhin, de la Meuse, de l'Escaut, bien que multiples, ne constituent pas de véritables deltas ; si le lit principal se subdivise, c'est que dans les plaines basses où finissent ces fleuves, le moindre obstacle détermine la formation de bras secondaires et d'îles. Qu'on vienne à fermer l'un de ces bras, celui qui reçoit l'eau supplémentaire ne se ramifie pas, même s'il n'est pris aucune disposition pour guider le courant.

Actions combinées de la mer et du fleuve. — La distinction ci-dessus établie entre les origines des barres marines et fluviales n'est donc pas radicale. On ne comprendrait pas qu'à l'embouchure du Rhône, du Danube, du Mississipi, les vagues restent totalement étrangères à la formation de la barre, puisque devant les fleuves de la Baltique déjà cités

elles en sont l'unique agent. De même, un grand nombre de barres marines sont composées du mélange des apports du fleuve et de la mer. Il arrive aussi qu'après la constitution du bourrelet les alluvions du fleuve sont arrêtées sur le talus intérieur, tandis que la mer accumule ses matériaux du côté du large.

Il importe donc, avant d'entreprendre l'amélioration d'une embouchure, d'étudier le mode de formation de la barre, car de son origine dépend le procédé à mettre en œuvre. L'analyse minéralogique des sables qui la constituent, trop négligée d'ordinaire, est de nature à donner les indications les plus précieuses.

Barres devant les baies. — Les barres ne se trouvent pas seulement devant l'embouchure des cours d'eau. Il existe dans les mers à marées des baies communiquant avec l'Océan par un goulet devant lequel l'effort des lames accumule des matériaux, que les courants de marée empêchent de s'élever au niveau de la surface et qui constituent une barre sous-marine. Il est évident qu'en ce cas les alluvions ne proviennent que de la mer. Nous citerons comme exemples les baies d'Otago dans la Nouvelle-Zélande, de Charleston, de Galveston aux Etats-Unis.

Conséquences de l'origine des barres. — Les barres étant dues principalement à l'action des vagues dans les mers sujettes à marées, il en résulte que les embouchures protégées contre les lames doivent être exemptes de cet obstacle. C'est bien ce qu'on observe à Milford Haven, au Forth, à la Clyde, etc. Au Chili, tous les fleuves sont barrés, sauf le Rio Valdivia, qui seul débouche dans une baie abritée, celle de Corral, et dont le lit est pourtant encombré d'immenses bancs de sable. Des observations plus précises que celles que nous possédons sur les vents indiqueraient sans doute également quelle est l'influence de leur direction sur des fleuves non barrés comme la Tamise, par rapport à laquelle les vents les plus fréquents sont ceux de terre, et qui de plus peut être plus ou moins protégée des autres par la côte.

Le Wash, sur la côte orientale de l'Angleterre, est séparé en deux portions longitudinales par une étroite langue de sable ; la partie septentrionale est barrée, l'autre non, parce que les vagues et l'apport du sable viennent du nord.

Malheureusement, nous le répétons, les observations superficielles

des vents rendent ces comparaisons très difficiles. Il est à désirer que les ingénieurs qui publient le résultat de leurs travaux maritimes spécifient d'une façon complète les conditions météorologiques, physiques, etc. des localités ; ce sera le moyen de faire progresser une science encore bien obscure.

CHAPITRE XIII

PORTS

Dans les baies où l'abri est suffisant, on n'a, pour répondre aux besoins du commerce, qu'à établir des quais ou des ouvrages intérieurs tels que les bassins à flot, munis de leurs accessoires d'exploitation. Si la protection contre la mer n'est pas assurée, on la complète par des travaux de défense extérieure.

Définitions.— Les ouvrages extérieurs sont désignés indistinctement sous les noms de jetées, môles, digues, brise-lames et même breakwaters, d'où résulte de la confusion dans les descriptions. Nous distinguerons pour éviter toute ambiguité :

Les *jetées*, ouvrages surtout employés dans les ports de la Manche, de l'Océan Atlantique et de la Mer du Nord, dont le rôle principal est la délimitation du chenal d'entrée. Elles sont le plus souvent parallèles.

Les *môles*, murs enracinés à terre et s'avançant en mer pour protéger une étendue d'eau et lui donner le calme nécessaire à la sécurité des navires.

Les *digues*, îlots artificiels, murs isolés en mer, destinés à arrêter l'action des vagues.

Les *murs de mer*, revêtements ou quais destinés à la protection des rivages contre les vagues.

Les *épis*, murs transversaux ou perpendiculaires à la côte destinés en général à la protection des plages ; ils servent aussi parfois, sur une petite échelle, aux mêmes usages que les môles. Des épis transversaux s'emploient encore pour régulariser le cours des rivières.

Les *levées*, murs longitudinaux élevés dans les fleuves ou les estuaires pour limiter le lit ou le chenal.

Nous réserverons le nom de *brise-lames* aux chambres d'épanouis-

sement à plan incliné, où s'amortissent les vagues qui pénètrent dans les chenaux.

Catégories des Ports. — Suivant leur destination, on distingue les ports de *guerre*, de *refuge*, de *commerce* et de *pêche*.

La construction des ports militaires ne diffère pas de celle des ports de commerce ; mais le choix de leur emplacement est régi par des considérations particulières ; leurs ouvrages accessoires sont également différents.

Le rôle des ports de refuge indique qu'ils ne sauraient être établis que dans les estuaires ou les baies à grande profondeur où les navires fuyant la tempête peuvent pénétrer à toute heure. L'Angleterre est particulièrement favorisée sous ce rapport par la nature. L'Humber, la Tamise, la Severn, les Firths du Forth, de la Clyde, les baies comme Milford Haven, sont des types de cette catégorie d'abris. En France on peut citer les rades de Brest, de Lorient, de Toulon, de l'île d'Aix, l'estuaire de la Gironde, le vieux port de Marseille. Un certain nombre d'embouchures ont été transformées en ports de refuge par des travaux d'amélioration, comme la Tyne. On en a aussi construit d'artificiels (Cherbourg, Plymouth, Portland, bientôt Peterhead et Douvres).

L'existence des ports de commerce et de pêche est due, en général, à des conditions locales et à l'amélioration de moyens primitifs employés d'abord pour donner satisfaction à des intérêts établis.

Le déplacement d'un centre commercial est chose difficile. L'adoption par les navires d'un port nouveau, même plus sûr et plus commode, est l'œuvre du temps ; parmi de nombreux exemples, il suffit de citer celui de la Pallice, dont les bâtiments ignorent presque encore le chemin.

Quand il s'agit d'une construction concurrente d'autres déjà installées, il faut donc avant tout consulter les convenances du commerce, à moins que la création d'un abri ne prime toute autre considération. Mais on a et l'on aura encore plus désormais à créer des établissements dans les pays récemment ouverts à la civilisation ou pour repondre à des besoins nouveaux. Le choix de leur emplacement est de la plus haute importance pour leur avenir, la facilité des opérations, la sécurité des navires.

Appontements. — Parfois on a pas le choix. Les opérations se font obligatoirement sur une côte ouverte, exposée aux tempêtes et même

dans les temps ordinaires à de fortes houles. On établit alors des débarcadères qui s'avancent assez loin dans la mer pour atteindre les grands fonds ou dépasser les brisants. Ils se construisent en charpente ou en métal. La courte durée des premiers en limite l'emploi à des cas restreints.

Les appontements en fer reposent sur des pieux à pointes ou à vis. Les pieux à pointes s'enfoncent à la sonnette et sont reliés entre eux par des tirants et des pièces comme le wharf de Kotonou décrit ci-après. On emploie surtout ce genre de pieux pour les terrains durs.

Sur les plages sablonneuses, au contraire, on se sert plutôt des pieux à vis qui ont le double avantage de s'enfoncer aisément et de tenir plus solidement. Ils sont creux ou pleins ; la figure 75 représente un modèle de vis avec le mode de liaison à un pieu creux (M. Grange) ; il est à peu près le même pour un pieu plein.

Fig. 75. — Vis d'un pieu.

Le fonçage s'opère en général au moyen de longrines qui s'avancent en porte-à-faux sur la portion déjà construite ; on pousse le pieu sur un échafaudage volant et on le pose verticalement sur le fond. On établit alors sur son sommet une tête de cabestan, dont les barres sont réunies ensemble à leurs extrémités par un cordage sans fin qui passe

entre des mâchoires ; en tirant sur le cordage on fait tourner le cabestan et le pieu s'enfonce. Dans les endroits abordables, le cabestan se tourne directement à bras.

De pareils appontements existent sur un grand nombre de rades (Courtown, Delaware, Cadix, etc.). Sur les côtes anglaises, à Blankenberghe, à Nice, ce genre de constructions (en anglais *pier*) sert souvent de promenades.

Kotonou. — A Kotonou, sur le golfe de Benin (planche 1) les débarquements et embarquements se faisaient par des embarcations que d'habiles manœuvres nègres conduisaient au milieu des énormes vagues occasionnées par le cordon littoral désigné improprement sous le nom de *barre*, et qui est éloigné du rivage de 120 mètres.

Nous ignorons si un véritable port était possible sur cette côte ; sans doute, d'ailleurs la dépense en eût été hors de proportion avec les intérêts à desservir. On a adopté une solution moins coûteuse en construisant un appontement qui permet aux opérations de s'effectuer en dehors de la barre.

L'appontement a 236 mètres de longueur, avec tillac de 5,30 *m* de largeur supportant une double voie ferrée de 80 *cm* ; cette partie sert d'accès au débarcadère proprement dit qui a 44 mètres de longueur sur 19,50 *m* de largeur ; la longueur totale de 280 mètres dépasse de 160 mètres l'emplacement du cordon littoral.

La passerelle est constituée par six longerons dont quatre sont placés sous les rails et deux en bordure ; ils s'appuient à 4 mètres au-dessus des hautes eaux sur des traverses portées par des pieux à vis fixés dans le lit sablonneux de la mer. Toutes les pièces sont en acier, à l'exception des chapiteaux supérieurs des pieux et des vis.

Les 120 premiers mètres, jusqu'au cordon littoral, n'ont été foncés que dans des profondeurs inférieures à 4 mètres et sont relativement protégés par ce cordon. Cette distance a été partagée en quinze travées de 8 mètres chacune ; les palées qui les séparent se composent de deux pieux contreventés transversalement par des croix de Saint-André et réunis horizontalement aux longerons par des jambes de force qui donnent à l'ensemble une grande rigidité.

Mais elle n'est pas suffisante pour le reste de la passerelle ; aussi là, les palées sont doubles, ou plutôt deux palées pareilles aux précé-

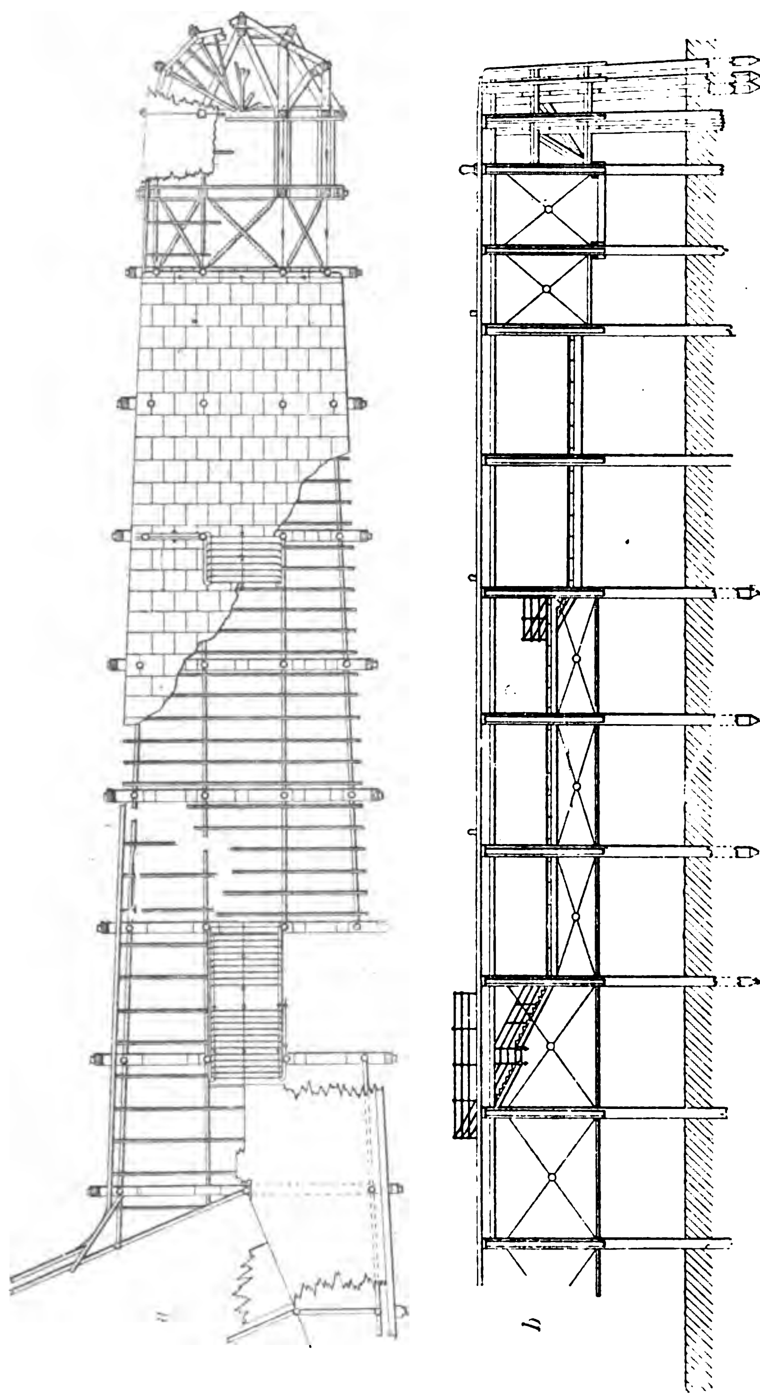


Fig. 75. — Appontement de Southampton; *a*, Plan; *b*, Élévation. — Échelle 1/350.

dentes sont réunies à 4 mètres de distance, reliées dans tous les sens ; les travées, au nombre de six, ont 12 mètres entre ces palées doubles.

Sur le débarcadère existent quatre voies ferrées.

Les pieux ont 14 *cm* de diamètre ; leur longueur varie de 7 à 8 mè-

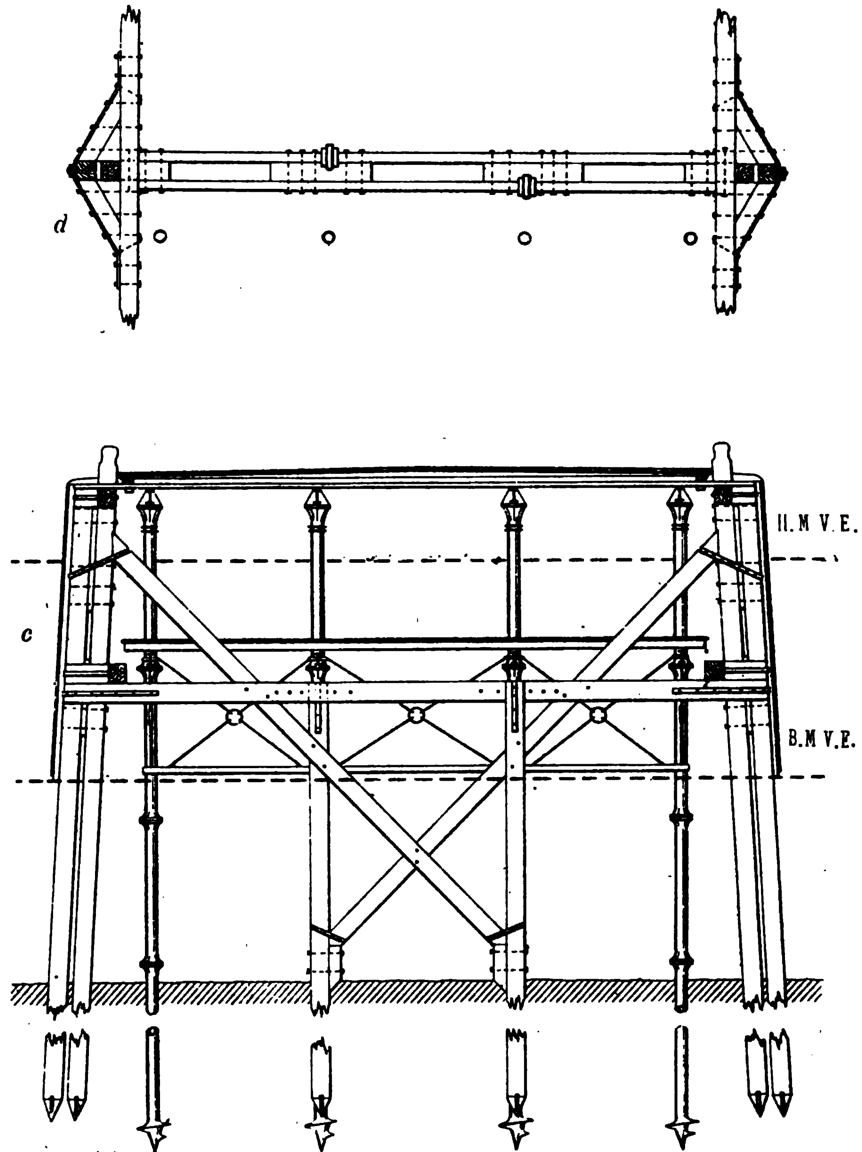


Fig. 76. — Appontement de Southampton ; *c*, Section transversale ; *d*, Entretoisement des pieux de défense.

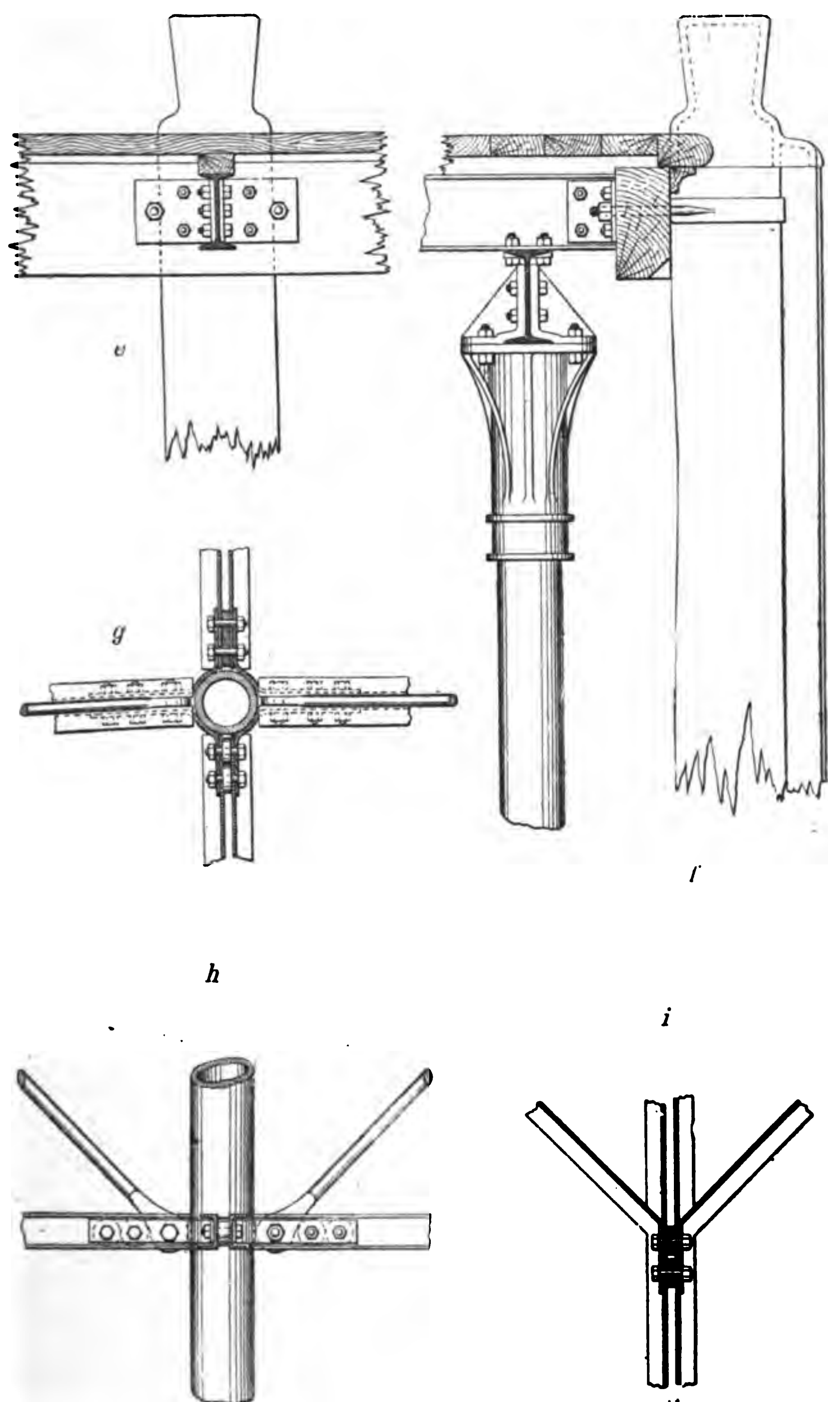
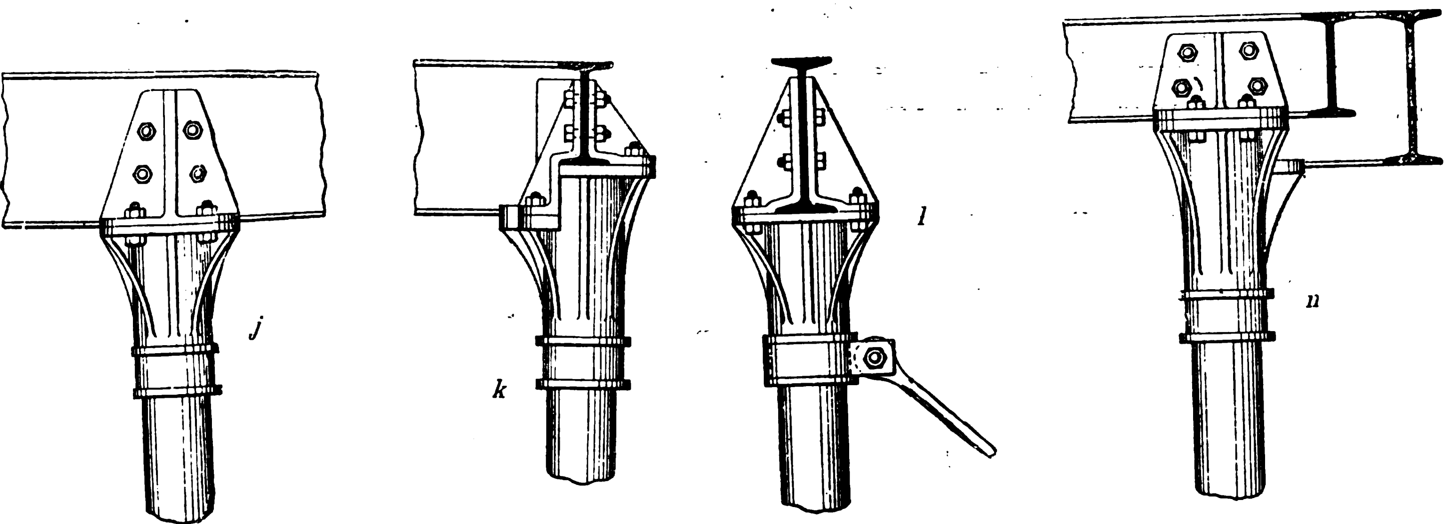
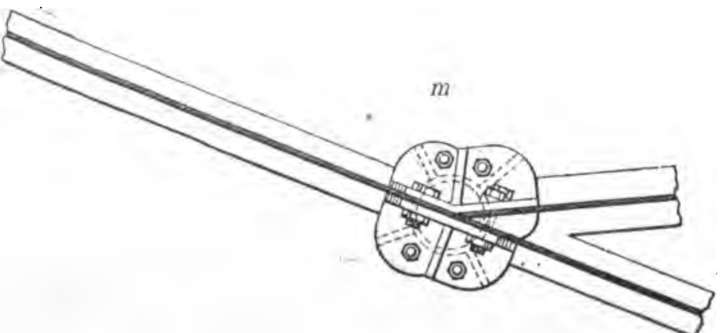
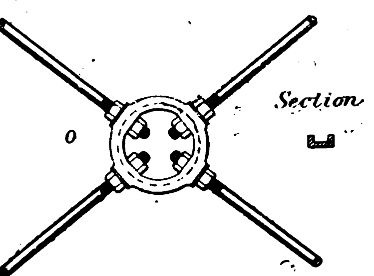


Fig. 76. — Appontement de Southampton; *e, f,* Liaisons et pieux en bois;
***g, h,* Contreventement horizontal, plan et elévation; *i,* Echarpes de contreventement horizontal.**







Échelle de 1/24

Fig. 76. — Appontement de Southampton ; *j*, *k*, *l*, *m*, Liaisons diverses ; *n*, Pieux en fonte et sommiers ; *o*, Anneau de tension.

tres suivant les profondeurs ; les contreventements sont en acier rond de 6 *cm* de diamètre. Les longerons ont 45 *cm* de hauteur et les traverses 60 *cm*.

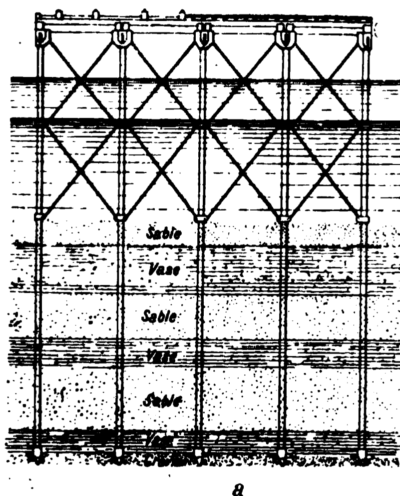
A l'extrémité, ainsi que l'indique le dessin, le débarcadère a été élargi à 15,30 *m* en deux points, pour recevoir deux grues; les traverses qui les supportent ont 80 *cm* de hauteur.

Deux escaliers sont ménagés à l'aval du débarcadère.

Le montage à Kotonou s'opérait au moyen de cabestans, comme nous l'avons décrit plus haut. L'échafaudage volant se composait d'un pont mobile sur galets, donnant 16 mètres de porte-à-faux, et portant à son extrémité deux bigues de 10 mètres de hauteur, qui servaient à lever et mettre en place les pieux. Ceux-ci étaient guidés par trois anneaux fixés sous les palans des bigues. Le guide supérieur était mobile autour d'un axe horizontal perpendiculaire au pont; le pied du pieu s'y engageait et pouvait ainsi basculer.

On fichait deux pieux en même temps ; tous les assemblages étaient boulonnés et non rivés, pour aller plus vite.

Nous donnons également, avec tous les détails d'exécution, le Royal Pier de Southampton (fig. 76 de *a* à *o*) où accostent les vapeurs du service de l'île de Wight, et qui mesure 55 mètres de longueur sur 9,75 *m* de largeur. Il est élevé sur des pieux en fonte de 12 mètres de long, ayant comme diamètre 180 *mm* avec 25 *mm* d'épaisseur de métal. Les vis ont 83 *cm* de diamètre.



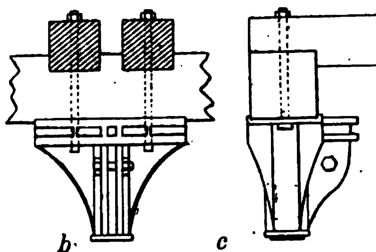


Fig. 77. — Appontement de la Delaware.
a Elévation ; *b* et *c* Assemblage.

La longueur des pieux est divisée en quatre morceaux.

Ces appontements en fer étant très usités, nous figurons encore (fig. 77), celui de la Delaware, avec des détails intéressants.

La fig. 77 *bis* représente un cabestan très bien compris pour vissage de pieux employé au pont de Vouneuil.

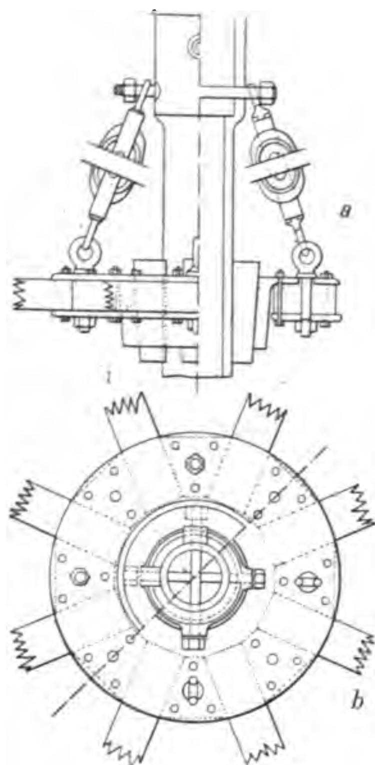


Fig. 77 *bis*. — *a* Mode de suspension ; *b* Plan du cabestan.

Ports artificiels. — Pour transformer en abris sûrs des baies trop ouvertes, on ferme par des ouvrages extérieurs l'entrée exposée. Cette clôture exige les études les plus minutieuses sur le régime des vents, la marche des alluvions, la direction des vagues ordinaires et de tempête, pour déterminer le choix du système le mieux approprié aux circonstances.

La protection peut se composer d'une digue isolée laissant une passe de chaque côté ; latitude est ainsi laissée aux navires de prendre l'une ou l'autre entrée, suivant la direction des vents. C'est de cette façon qu'ont été fermées les rades de Plymouth et de Cherbourg (pl. VIII, fig. 1) ; dans celle-ci la profondeur des passes est très inégale, de sorte que les petits bâtiments seuls ont le choix.

Ce sont des considérations militaires, depuis longtemps sans valeur, qui ont dicté l'emplacement de la digue de Cherbourg, qu'on aurait pu et dû fonder plus au large ; on aurait ainsi constitué un abri pour un plus grand nombre de navires. La disposition angulaire des deux branches de la digue et leur inégalité ont eu pour but de laisser à découvert les forts de l'île Pelée et de Querqueville.

A Plymouth, on avait d'abord proposé deux môles ; mais on a préféré conserver les deux passes latérales, plus commodes que celle qu'on aurait eue au milieu ; on craignit aussi la déviation des courants et par suite l'ensablement de la rade protégée.

La tranquillité n'est parfois pas suffisante avec une digue unique. On peut la remplacer par deux môles laissant entre leurs extrémités une ouverture plus ou moins centrale. Ce système a été peu appliqué dans de véritables baies; on en a pourtant des exemples à Barcelone (pl. VI, fig. 1), à Gênes (pl. II, fig. 2) et dans quelques petites criques.

A l'embouchure de la Delaware, on a construit deux digues, séparées par une passe (*gap*). La digue orientale est destinée à protéger la rade contre les vents régnants, du N O à l'est en passant par le nord; l'autre contre les glaces charriées par le fleuve; la première est formée de deux portions faisant entre elles un angle de 135°, pour se trouver normales, l'une aux vents de N O et l'autre à ceux du N E. Mais on n'a pas obtenu un calme suffisant; de plus, les alluvions pénétrant par la passe ont produit un tel envasement qu'on a dû la fermer.

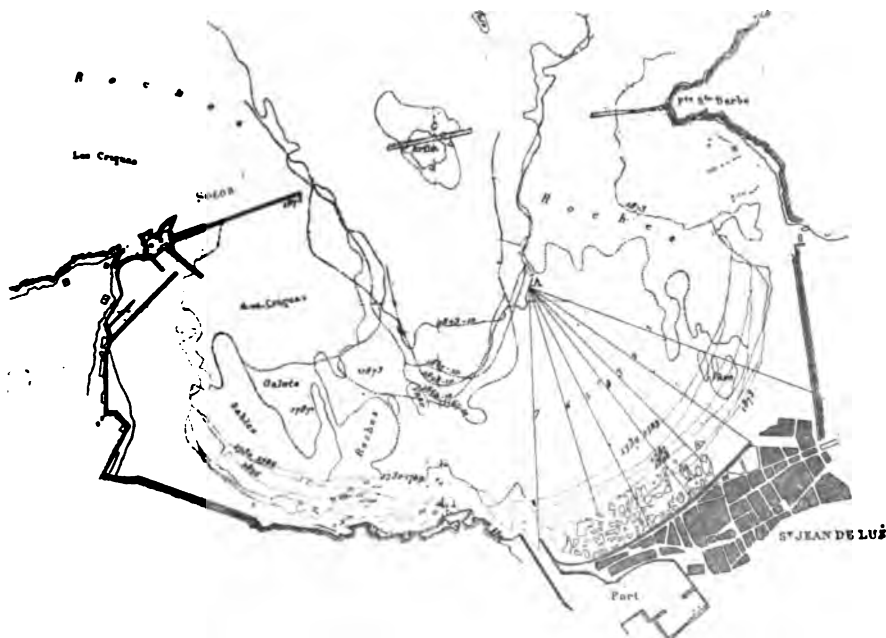


Fig. 78. — Plan de la baie de Saint-Jean-de-Luz.

A Saint-Jean-de-Luz, la baie est close par une digue (Artha) et deux môles (Socoa et Sainte-Barbe) (fig. 78). Les deux passes de Cherbourg ayant été reconnues trop larges, on les rétrécit également par deux môles latéraux.

Un môle unique, généralement courbe, a été souvent employé pour protéger une portion de côte déjà abritée par une découpure; ainsi le port-refuge d'Holyhead (fig. 79), le vieux port de Bastia.

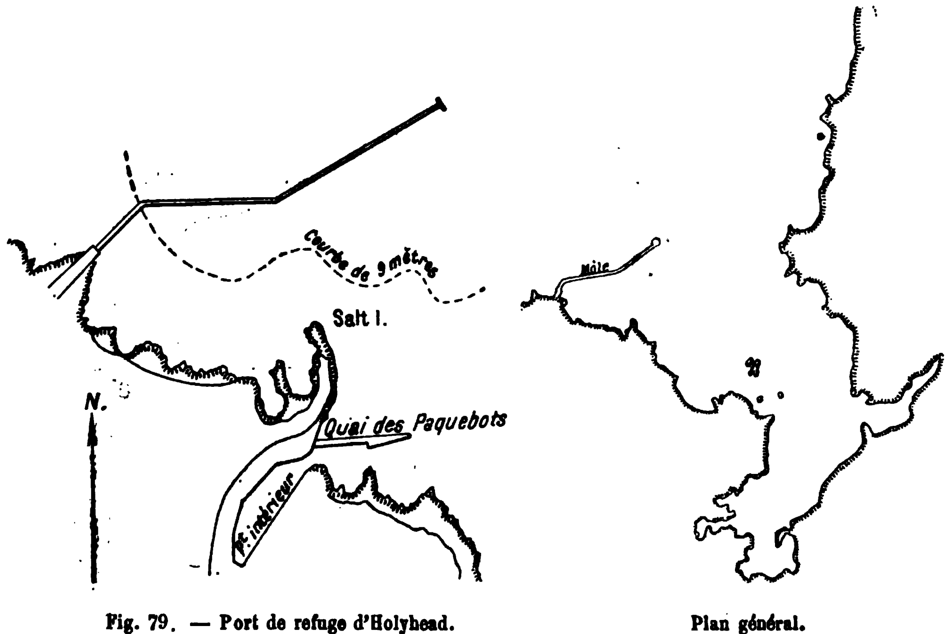


Fig. 79. — Port de refuge d'Holyhead. Plan général.

Au nord de la presqu'île de Portland (fig. 80), on a continué la côte par un môle, prolongé lui-même par une digue, laissant une passe entre les deux ouvrages; les forts vents venant du sud, on a obtenu ainsi un espace bien abrité. Néanmoins, on construit actuellement une nouvelle digue en prolongement de l'ancienne, pour compléter la protection.

Quelquefois, surtout quand les vents régnants sont de terre, un môle suffit même sur une côte ouverte (Newhaven, fig. 81).

Enfin, sur des côtes non découpées, on a construit des ports absolument artificiels, par deux môles enracinés à une certaine distance et convergeant de façon à laisser une passe entre leurs extrémités : l'étendue ainsi close peut constituer elle-même le port : Madras (fig. 82), d'autres fois, elle ne sert que d'avant-port : Ijmuiden (pl. III, fig. 2), Pointe des Galets (fig. 93) et le véritable port est creusé à l'intérieur des terres. Quand la mer n'est à craindre que d'un seul côté, un môle est suffisant : Colombo (fig. 83) ; cependant, dans l'exemple cité,

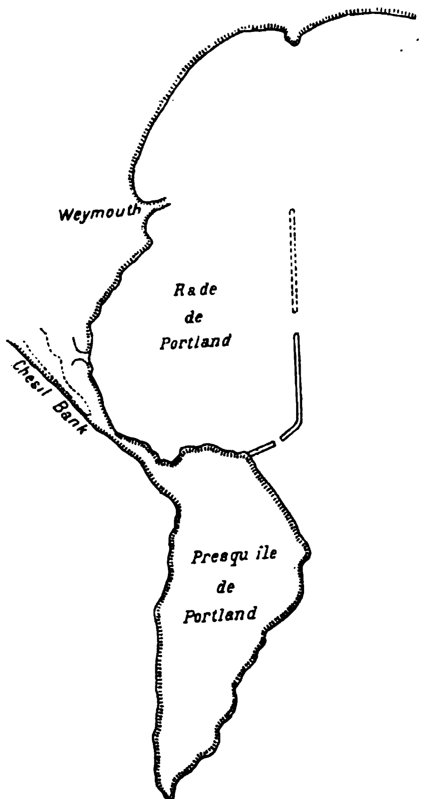


Fig. 80. — Port de Portland.

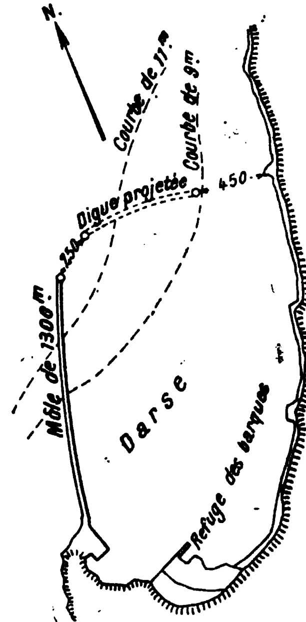


Fig. 83. — Port de Colombo.

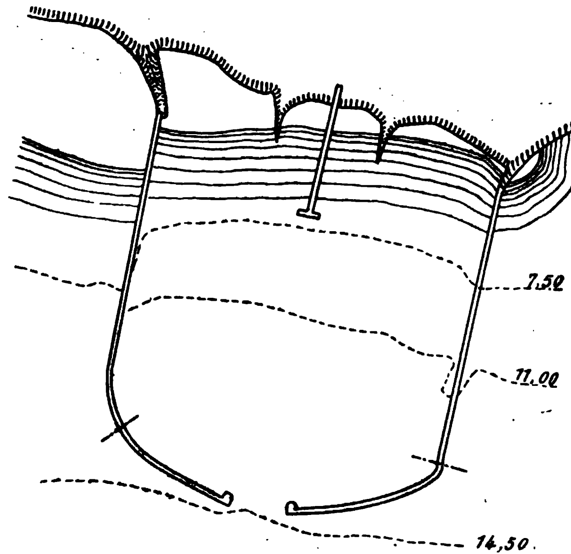


Fig. 82. — Port de Madras.

on a l'intention de protéger davantage le port par une digue. A Trieste (pl. II, fig. 4), à Marseille (pl. II, fig. 1), c'est une digue parallèle à la côte qui abrite des darses intérieures. A Livourne (pl. VII, fig. 1), où n'existait d'abord qu'une seule digue circulaire, on a dû en construire une nouvelle presque normale au rivage. A Cette, des prolongements de la digue primitive ont suffi pour assurer le calme.

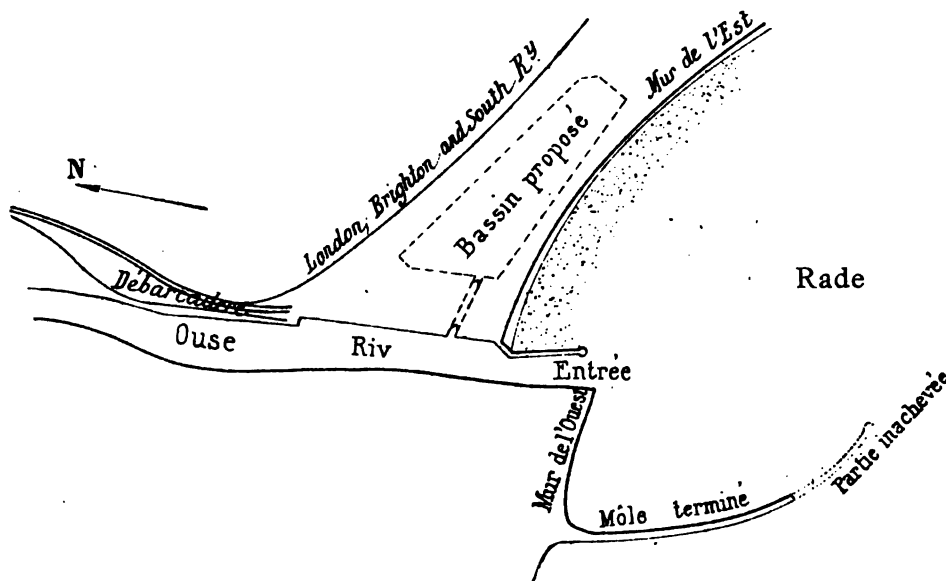


Fig. 81. — Port de Newhawen. — 1/20000.

Les combinaisons des môles et digues sont donc très variées, suivant les conditions de la côte à protéger.

Estuaires. — En dehors des estuaires qui constituent des ports naturels (Tamise, Gironde) on a amélioré les embouchures de certains fleuves, primitivement barrés (la Liffey, la Tyne, la Tees). L'amélioration, en général, s'effectue en reportant l'entrée en dehors de la barre par un système de môles. Ce procédé ne suffit pas toujours, car la barre a une tendance à se reformer au delà de l'extrémité des ouvrages ; le succès est l'œuvre de conditions spéciales et on l'obtient le plus souvent par des dragages.

Lagunes. — A Venise, le port est situé au fond de la lagune qui communiquait avec la mer par cinq passes, dont deux ont été améliorées.

De même à Karachi (ancien Kurrache), où le bassin intérieur n'a qu'une entrée (fig. 88).

Entrée. — Quel que soit le dispositif adopté, la position de l'entrée domine toutes les autres conditions. Elle doit être à l'extrémité des ouvrages de protection, vers la mer, pour que les navires y pénètrent sans crainte d'être drossés latéralement. Dans les ports de refuge, dans ceux où l'avant-port est suffisant, l'entrée doit être directement exposée aux lames de tempête, pour qu'elles portent à l'intérieur le navire fuyant devant le temps. Dans les ports à jetées parallèles, le chenal est légèrement incliné sur la direction de ces vagues. On a parfois avantage à prolonger le môle situé du côté du vent dominant plus loin que l'autre, afin de protéger l'entrée et aussi la sortie des bâtiments.

On doit surtout mettre la passe à l'abri des alluvions; aucune règle ne peut être donnée à cet égard; l'étude des conditions locales peut seule indiquer la solution.

Il ne faut pas perdre de vue que la projection de môles devant un rivage renforce les courants littoraux, qui peuvent devenir gênants pour la manœuvre des navires (voir page 98).

La largeur de l'entrée doit être réduite autant que possible pour assurer la tranquillité du bassin intérieur; mais elle ne peut dépasser le minimum nécessaire aux évolutions des bâtiments; on doit se garder aussi de provoquer un trop fort courant de flot ou de jusant à la passe.

Il faut encore tenir compte, en effet, de la facilité de manœuvre des navires. S'ils viennent directement de la mer, si l'espace qu'ils trouvent devant eux pour éteindre leur erre est considérable, ils entreront à grande vitesse et la largeur de l'entrée peut être réduite.

Il en sera autrement si le navire est forcé d'*abattre* avant d'aborder les musoirs, par suite de la présence de caps, de récifs extérieurs, ou s'il entre à une allure réduite pour une raison quelconque. L'existence de forts courants transversaux est aussi une cause d'élargissement de l'entrée. Au Havre, où l'on a dû limiter à 100 mètres la largeur de la passe, il n'est pas possible aux bâtiments de pénétrer au moment de l'intensité maxima des courants et le bénéfice de la longue durée de l'étale est en partie perdu. On sera dans de meilleures conditions avec la nouvelle entrée.

A Ijmuiden, on a donné 260 mètres à la passe, dimension considé-

rable pour un avant-port qui ne mesure que cent hectares, mais un courant traversier de 4 nœuds a exigé cet élargissement.

Nous donnons dans le chapitre spécial aux ports à jetées parallèles la largeur de l'entrée des plus importants d'entre eux.

Largeur de l'entrée de divers ports artificiels

La Tyne . .	330 *m* (provisoirement)	La Pallice	90 *m*
La Tees . .	730 »	Pointe des Galets	100
Sunderland .	150	Madras	170
Dublin. . .	300	Ijmuiden.	260
Charlestown .	580	Hoek von Holland. . . .	700
Gênes . . .	650	Barcelone	280
Malamocco .	470	Valence (projet).	860
Lido . . .	900	Port-Saïd	700

AVANT-PORTS

L'entrée aboutit, soit directement, soit par un chenal, à un bassin qui parfois constitue lui seul tout le port; dans les mers à grandes marées, ce bassin est en général à sec à basse mer, ce qui n'offre guère d'inconvénient, le fond étant d'ordinaire composé de boue au milieu de laquelle les œuvres des bâtiments ne souffrent pas.

Le plus souvent, ce bassin ne constitue qu'un *Avant-port* et communique avec d'autres dans lesquels s'opère la manutention des navires.

Longueur. — C'est dans l'avant-port que les navires doivent éteindre leur erre, c'est-à-dire amortir leur vitesse ; il faut, à cet effet, une longueur suffisante et l'on admettait autrefois qu'elle devait être de 4 à 600 mètres, suivant les proportions des navires reçus. Avec les vapeurs, qui stoppent facilement, en peut réduire cette dimension.

Forme. — Un avant-port courbe a l'avantage de ne pas recevoir directement la lame ; aussi était-ce jadis une règle qu'on ne devait voir la mer d'aucun de ses points. Mais la forme courbe offre l'inconvénient d'une manœuvre difficile à l'entrée, parce qu'on doit faire abattre brusquement les navires, opération presque impossible aux grands bâtiments. Aussi dans les nouvelles constructions évite-t-on au contraire les courbes.

Au Havre, l'avant-port est encore infléchi ; les voiliers, qui autrefois y entraient par leurs propres moyens, à peine à l'intérieur mouillaient une ancre sur laquelle ils s'arrêtaient ; ils tournaient alors autour de leur chaîne et présentaient l'avant au chenal. Cette manœuvre est inutile pour les vapeurs et les remorqueurs. On a commencé des travaux pour faire de cet avant-port, agrandi et redressé, un bassin de refuge.

Superficie et largeur. — Une Commission italienne (1873) a donné pour la superficie de l'avant-port Z_a la formule suivante :

$$Z_a = \Sigma\, 3,4\, \beta L l$$

dans laquelle L et l représentent la longueur et la largeur moyennes des bâtiments qui fréquentent le port, et β un coefficient variable suivant la tranquillité, la forme et la dimension de l'avant-port, et aussi le nombre de passages qu'on veut laisser entre les files des bâtiments. Le signe Σ indique qu'il faut faire la somme du produit de ces quantités pour le nombre maximum de navires qui se trouvent en même temps dans le port. Le facteur β n'est qu'un coefficient de sécurité ; on le prendra donc de façon à éviter tout mécompte, mais il pourrait à la rigueur descendre à 1.

Il ne faut pas oublier de ménager un espace libre pour les manœuvres et l'amarrage des navires entrant de nuit.

Réduction des vagues. — La largeur est surtout intéressante au point de vue de la tranquillité à obtenir. M. Th. Stevenson a établi, pour calculer la réduction de la hauteur qu'éprouve la vague en s'épanouissant, la formule suivante :

Étant donnés, dit-il, des môles assez élevés pour abriter du vent la surface intérieure, la profondeur suffisamment uniforme, la largeur de l'entrée pas très grande en comparaison de la section de la vague, les murs verticaux ou à peu près, la distance de l'entrée au point d'observation supérieure à 15 mètres, si l'on prend en pieds :

H la hauteur de la vague à l'entrée ;
b la largeur de l'entrée ;
D la distance de l'entrée au point d'observation ;

B la largeur du port en ce point, largeur mesurée suivant l'arc décrit avec le rayon D;

x la hauteur réduite de la vague,

On a :

$$x = H\left[\sqrt{\frac{b}{B}} - \frac{\sqrt[4]{D}}{50}\left(1 + \sqrt{\frac{b}{B}}\right)\right]$$

Cette formule, en transformant toutes les valeurs en mètres, devient

$$x = H\left[\sqrt{\frac{b}{B}} - 0,027\sqrt[4]{D}\left(1 + \sqrt{\frac{b}{B}}\right)\right.$$

L'auteur a donné un grand nombre d'observations pour justifier sa formule.

Il faut remarquer les conditions énumérées pour son application. La plus importante, évidemment, est l'uniformité de profondeur du bassin de réduction. Ainsi, les résultats obtenus ne se vérifient pas à Ijmuiden, où l'avant-port n'est creusé à la profondeur de 7 mètres que sur une portion restreinte de sa surface. Il ne faudrait pas non plus compter dans la longueur D la longueur du chenal de nos ports à jetées parallèles, où la hauteur de la vague se conserve presque immuable s'il n'existe des brise-lames. M. Stevenson a donné sa formule pour des ports à bassin communiquant directement avec la mer (Kingstown, Sunderland, Buckie, etc.).

Le rapport $\frac{x}{H}$ est désigné par l'auteur sous le nom de *puissance réductive* du port au point considéré.

Rôle de l'avant-port. — En outre des nécessités auxquelles satisfait l'avant-port et qui ont déjà été exposées, ce bassin remplit encore un rôle accessoire souvent fort important. Non seulement il reçoit les navires en relâche, mais il est affecté au service des petits vapeurs qui font le service des passagers avec les localités voisines. L'entrée et la sortie des *bassins à flot*, qui constituent véritablement le port, occasionneraient à ces bâtiments des retards qu'ils ne peuvent supporter. On leur réserve généralement un quai spécial ; c'est ce qui a lieu à Calais, à Boulogne, à Dieppe, pour les bateaux affectés à la traversée de France en Angleterre.

Dans la Méditerranée, les darses, ouvertes sur la mer, reçoivent directement les vagues des tempêtes et sont toujours plus ou moins agitées, à moins que leur entrée ne soit très étroite et très protégée, comme au Vieux Port de Marseille.

A Cette, à Civita-Vecchia, ce sont des digues extérieures qui forment une sorte d'avant-port. A Gênes on a multiplié les môles. A Marseille on a projeté une grande digue, à l'abri de laquelle les navires pourraient entrer en tout temps au lieu de relacher, comme aujourd'hui à l'Estaque, en cas de tempête. A Naples (pl. II, fig. 2), on achève de nouveaux môles de protection.

On tend donc de plus en plus à fermer complètement les ports, mais leurs conditions spéciales rendent nombreuses les solutions à intervenir.

Les avant-ports ont des quais, des installations analogues à ceux des bassins à flot; ils seront décrits en même temps.

CHAPITRE XIV

PORTS A CHASSES NATURELLES

Dans les ports de la mer du Nord, comme Calais et Dunkerque, les chasses naturelles produites par les criques intérieures où ils furent établis entretenaient autrefois dans les chenaux d'accès les faibles profondeurs exigées par les barques de cette époque. Le creusement ne pouvait être considérable, parce que le lit de la mer avoisinante était très plat et que le volume d'eau était insuffisant pour fouiller un chenal à de grandes distances.

Avec un bassin très étendu et un estran sablonneux très réduit aboutissant à des profondeurs notables, on peut espérer au contraire que le jeu des marées arrive à creuser un chenal d'une profondeur suffisante qui permette l'accès de grands navires. En réalité afin d'obtenir le résultat désiré, il a toujours fallu des travaux ayant pour but :

1° De limiter la largeur du chenal et par suite de concentrer sur un faible espace l'effet de la chasse naturelle ;

2° De reporter l'entrée jusqu'à des profondeurs suffisantes pour que la chasse n'ait à exercer son action que dans le chenal limité ou à une faible distance au delà.

En dehors de ces conditions, on n'a jamais pu entretenir un chenal par une chasse naturelle sur une plage sablonneuse.

Venise. — Les Italiens ont l'adage : *Gran laguna fa buen porto*, les grandes lagunes font les bons ports. Il ne faudrait pas regarder cet adage comme un axiome, loin de là. Nos côtes de la Méditerranée sont bordées de lagunes qui ne constituent même pas de mauvais ports. En Italie, une seule grande lagune communique avec la mer, c'est celle de Venise, qui n'était un port que pour les petits navires de l'ancienne République. Nos lagunes méditerranéennes n'ont pas le jeu des marées pour entretenir un chenal ; quant à Venise, où la marée

est sensible quoique faible, on n'a pu l'utiliser et obtenir de grandes profondeurs à l'entrée que par des travaux artificiels.

La lagune de Venise (fig. 84), qui mesure 550 kilomètres carrés, est séparée de la mer par une étroite bande de sable, un *lido*. Elle communique avec l'Adriatique par cinq passes, dites ports : Treporti, San

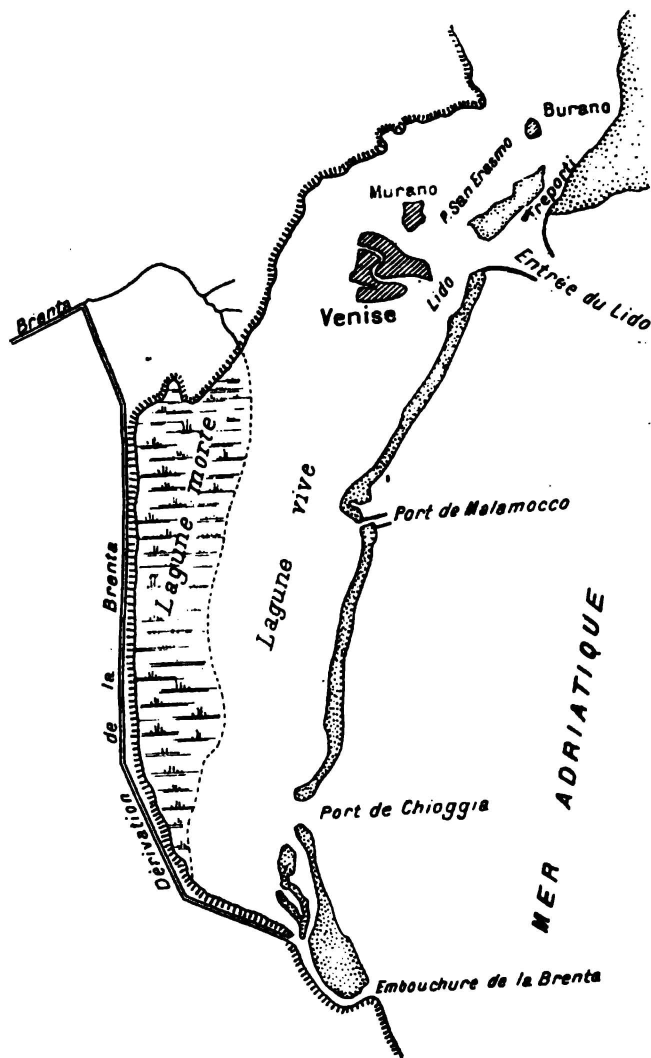


Fig. 84. — Lagune de Venise.

Erasmo, Lido, Malamocco et Chioggia. Celles de San Erasmo et Chioggia étaient ensablées ; les chasses entretenaient des profondeurs de 1,30 *m*

dans Treporti et 4 mètres à Malamocco. La passe du Lido, presque en face de Venise, n'avait que 2,60 *m*.

La lagune elle-même se comblait rapidement par les apports des rivières qui s'y jetaient, provenant des contreforts méridionaux des Alpes ; on dut détourner leur cours et diriger leurs embouchures au nord et au sud de la lagune.

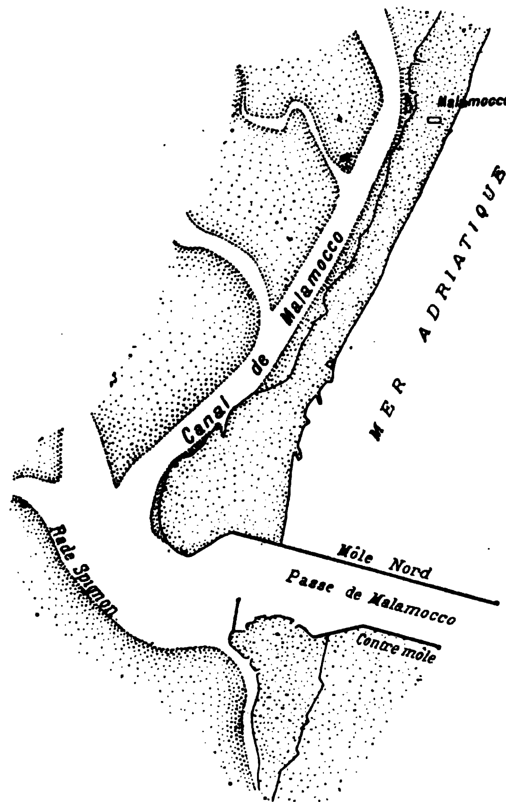


Fig. 85. — Passe de Malamocco.

Prony et Sganzin proposèrent en 1806 d'améliorer l'entrée de Malamocco par deux jetées en maçonnerie, presque parallèles, et atteignant les fonds de 9 mètres (fig. 85). Ces jetées ont été construites : celle du nord a une longueur de 2 200 mètres, celle du sud de 985 mètres ; leur distance minima est de 470 mètres. Les vents dominants à Venise sont ceux du premier quadrant ; en frappant la côte ils poussent les matériaux du nord au sud ; aussi, y a-t-il eu accumulation de

sables à l'angle externe de la jetée nord. Les chasses naturelles ont creusé et maintiennent le chenal à une profondeur de 9 mètres. Le canal de 13 kilomètres de longueur qui réunit la passe de Malamocco à la ville a été approfondi à 8,50 *m.*

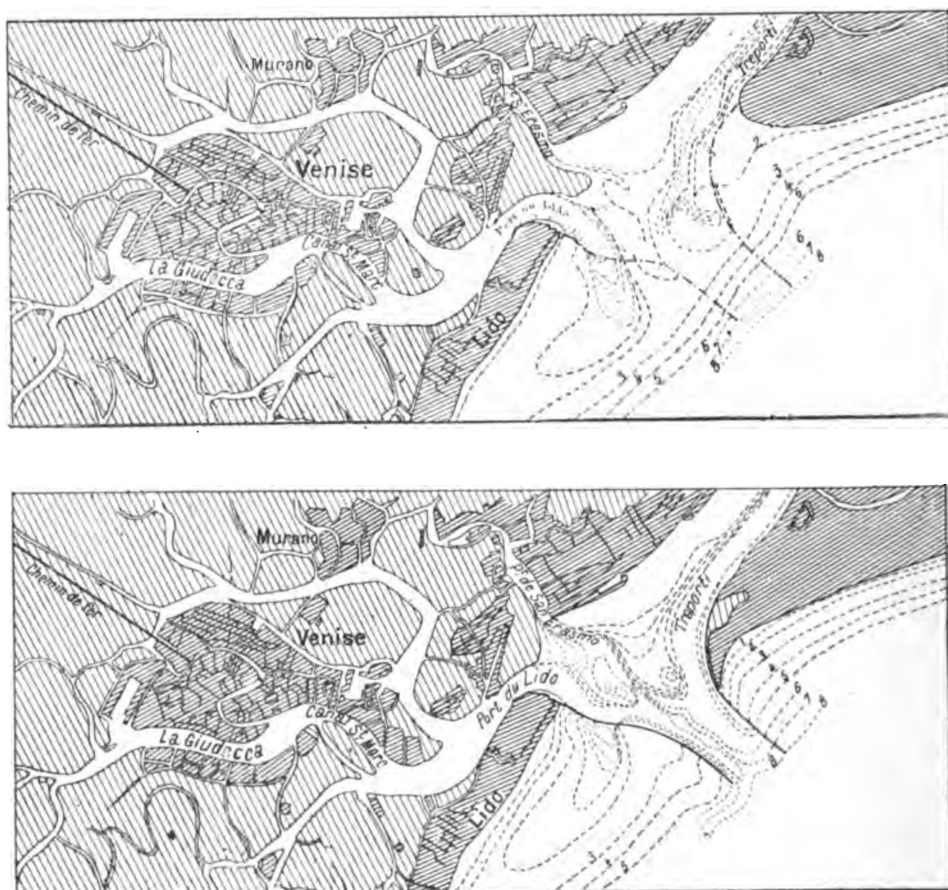


Fig. 87. — Le port du Lido en 1882 et en 1898.

Mais l'éloignement de cette entrée était l'objet des justes plaintes des Vénitiens. On s'est résolu à tenter le même système pour améliorer l'entrée du Lido voisine de la ville. Après de longues études, on réunit les trois passes de Lido, de San Erasmo et de Treporti entre deux jetées distantes de 900 mètres à l'entrée. Cette largeur a été fixée par comparaison avec celle de Malamocco, en tenant compte des superficies relatives des portions de la lagune qui se déversent par l'une et l'autre

ouverture. Les musoirs atteignent les profondeurs de 8 mètres; la jetée nord a 3 450 mètres de longueur, celle du sud 2 850 mètres.

Nous devons à l'obligeance de M. l'Ingénieur Alberto Torri les plans de sondages près du port de Lido à diverses époques (fig. 87). Le succès est absolument complet, ce qui d'ailleurs ne pouvait faire aucun doute, vu la situation privilégiée de Venise sur une plage à faibles apports, et avec cette circonstance que le jusant dure moins longtemps que le flux, d'où résulte une plus grande vitesse du courant à la sortie qu'à l'entrée.

Karachi. — Le port de Karachi est situé sur la mer d'Oman, à l'extrémité nord de la côte orientale de l'Inde, au fond d'une vaste baie, sorte d'estuaire du Layari, ruisseau presque toujours à sec. La superficie de ce bassin est de plus de 3 000 hectares ; l'amplitude de la marée qui y entre aux vives eaux moyennes est de 2,25 *m* (fig. 88).

La baie est limitée à l'ouest par un promontoire élevé d'une trentaine de mètres, la pointe de Manora, de laquelle se détachait vers l'est une langue de sable ; l'autre rive était formée par une plage sablonneuse, découverte à basse mer et appuyée contre une côte rectiligne de l'ouest à l'est. La plage s'avançait également en pointe, terminée par un crochet ; c'était la reproduction de l'estuaire du Maule, tel que nous l'avons décrit, et l'inspection de la carte suffit pour faire voir que les sables marchent de l'ouest vers l'est.

Pendant trois mois, de mi-juin à mi-septembre, règne la mousson du sud-ouest ; de mi-octobre à mi-février, pendant quatre mois, soufflent de fortes brises de l'est. Celles-ci l'emportent donc pour la durée et la violence, mais elles sont vents de terre pour Karachi et n'influencent pas la mer, qui est au contraire agitée par les vents d'ouest ; agitation d'ailleurs relative, car la hauteur des lames ne dépasse jamais 5 mètres et les atteint rarement. Ces données suffisent pour expliquer la direction de la marche des alluvions et des lames.

Le talus de la plage est très rapide devant la pointe de Manora ; on y construisit un môle, non exactement dans le prolongement du promontoire, mais avec une direction un peu inclinée vers l'ouest. Sa longueur est de 460 mètres, et il atteint les fonds de 9 mètres. Son but est de s'opposer à la propagation de la lame et au dépôt de sable dans l'entrée.

La rive de l'est a été contenue et régularisée par un épi d'une lon-

gueur de 2700 mètres, légèrement courbe, distant de Manora Point de 1200 mètres à la racine et de 650 mètres à l'extrémité.

La courbure du promontoire et du môle oriental sont dans le même sens, disposition qu'on n'a guère employée, — à tort, car dans certains cas elle peut être d'une grande efficacité.

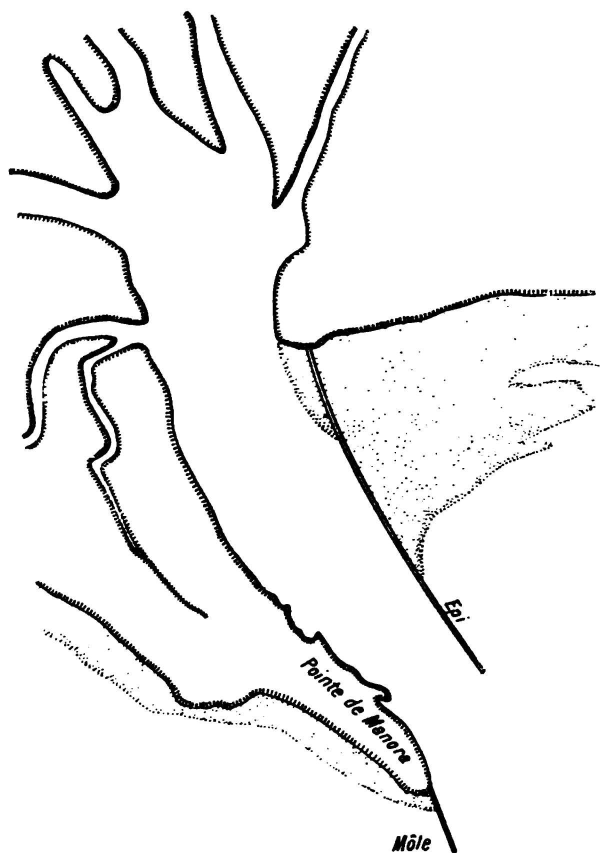


Fig. 88. — Karachi.

On a dû aider le creusement du chenal par le dragage ; mais peut-être le dragage eut-il été inutile, si l'on avait laissé le temps opérer son œuvre ; en tout cas, l'entretien des profondeurs obtenues se fait naturellement. La profondeur du chenal, autrefois de 5 mètres, est aujourd'hui de 7 mètres ; la hauteur des lames est réduite des deux tiers à l'entrée.

Nieuwe-Diep (fig. 89 et 90). — A l'embouchure du canal de Nord-Hollande, dans le Zuyderzée, entre la terre ferme et l'île du Texel,

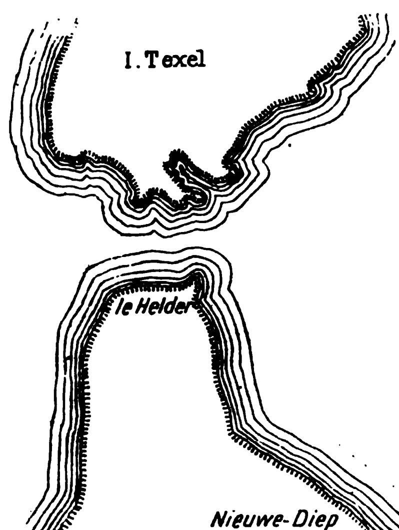


Fig. 89. — Détroit du Texel.

près du Helder, on a profité d'une façon remarquable des chasses naturelles. A la marée montante, le flot emplit le vaste bassin du Zuyderzée ; et au jusant la mer se retire en côtoyant le rivage est de la pointe du Helder, où se trouve Nieuwe-Diep.

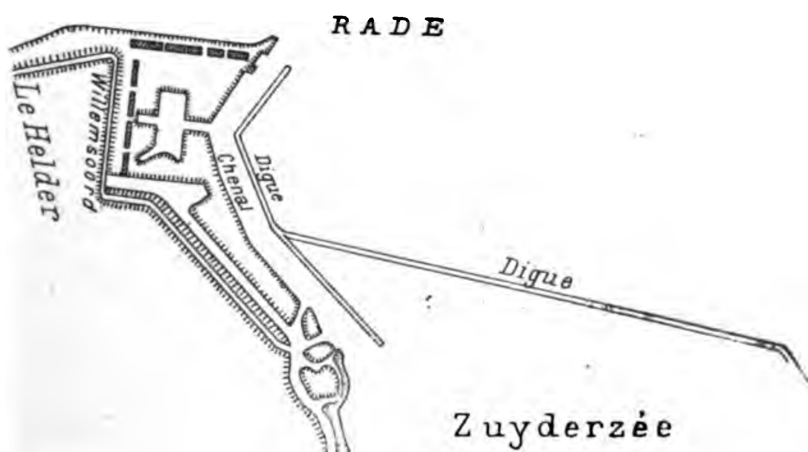


Fig. 90. — Digue de Nieuwe-Diep.

L'énergie du courant de jusant est accrue par deux causes : Vu la longueur de la mer intérieure hollandaise et de sa direction, le flot la remplit encore au nord, tandis que le bassin se vide déjà au Helder. D'autre part, l'interférence de deux ondes rend la marée à Nieuwe-Diep la plus faible de toute cette côte ; elle ne dépasse guère 1,20 *m* tandis que les passes du nord du Zuyderzée éprouvent des amplitudes qui vont jusqu'à 2 mètres.

On a établi le long de la côte un chenal de 110 mètres de largeur, limité par une digue en terre avec revêtement de fascines et d'enrochements, longue de 1 950 mètres ; une seconde digue, formant avec la première un entonnoir, ramène dans le chenal une grande partie de l'eau du jusant, qui y acquiert une vitesse considérable.

Des raisons locales ont déterminé le prolongement de la première digue au delà de l'entonnoir, mais sans modifier le principe.

On a ainsi obtenu des profondeurs de 9 mètres, là où n'y avait primitivement que 4 mètres.

Devant le port militaire de Willemsoord on sonde jusqu'à 20 mètres, et les grandes profondeurs s'étendent sur trois canaux ramifiés ; elles augmentaient au point qu'on a dû arrêter les surélévations des digues.

Cet exemple ne doit d'ailleurs être imité qu'avec la plus grande circonspection et après examen détaillé des circonstances spéciales de la localité. Le succès est dû à ce que les profondeurs à la sortie du canal sont considérables, plus de 12 mètres, de sorte que les matières entraînées tombent dans les grands fonds. Mais dans bien des cas, une telle disposition ne pourrait que provoquer l'envasement.

PORTS A MOLES CONVERGENTS

Kingstown (fig. 91). — Le port de Kingstown est formé d'un bassin rectangulaire conquis sur la mer par des môles convergents ; il est célèbre pour être le seul exemple de port établi sur une plage dite sablonneuse, et dont les profondeurs se maintiennent sans entretien. On a beaucoup discuté les raisons de cette immunité de Kingstown ; elle paraît explicable par sa situation même (pl.IX, fig. 1).

Le port se trouve sur le rivage méridional de la baie de Dublin, rivage qui court de l'est à l'ouest ; à l'est, la côte est absolument libre

de sable et les profondeurs de 15 mètres se trouvent tout près de terre.

Les vents régnants en Irlande sont ceux du SO, mais à Kingstown ils viennent de terre et n'ont pas d'influence sur les vagues. Ceux du NE,

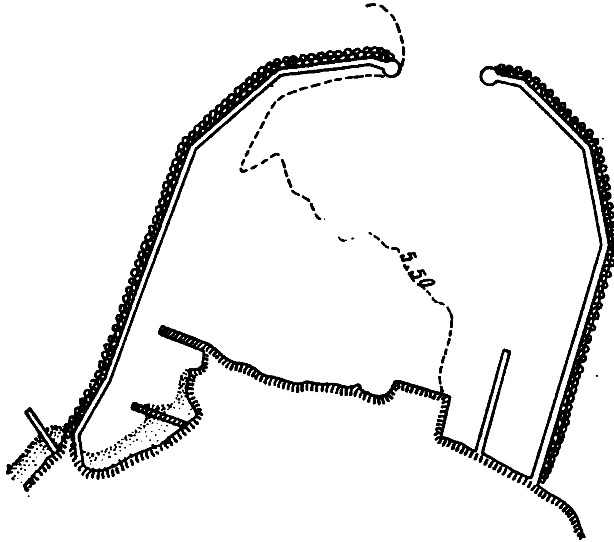


Fig. 91. — Kingstown.

dominants, n'ont qu'un *fetch* limité et sont par conséquent peu actifs. Les vents d'amont poussent dans la baie des vagues qui s'étalent dans la direction des lignes méridiennes, mais ces vagues n'ont pu rencontrer, à l'est, que les bancs *Burford Bank et Kishbank*, trop profondément situés (à la cote—5 *m*) pour avoir pu être écrétés ; en tout cas, s'ils le sont, les particules sablonneuses emportées se déposeraient dans les grands fonds de 20 mètres qui se trouvent entre eux et Kingstown sur une longueur de plusieurs milles.

Donc les vagues ne portent rien devant l'entrée de Kingstown.

Il existe au fond de la baie deux bancs considérables, le *North Bull* et le *South Bull;* ils seraient à craindre si le transport des alluvions était dû aux courants de jusant, mais l'influence des lames est tellement prépondérante que les sables de ces bancs ne peuvent être au contraire que repoussés vers le fond de la baie.

Il est donc possible de regarder Kingstown comme établi sur une plage non sablonneuse.

Howth (fig. 92). — Pour apprécier les conditions favorables de Kingstown, il n'y a qu'à les comparer avec celles de Howth, construit

comme le précédent port par sir John Rennie, qui avait pensé qu'un établissement hors de la baie de Dublin serait moins exposé à l'invasion des sables.

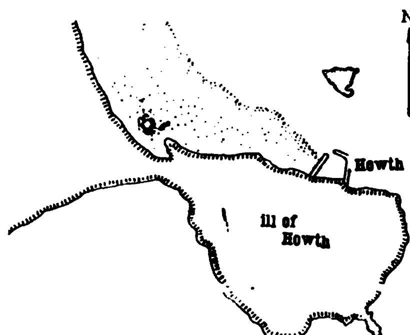


Fig. 92. — Port de Howth.

Le port de Howth a été placé au nord de la presqu'île montagneuse, le *Hill of Howth*, qui ferme la baie de Dublin; en face se trouve un îlot, l'*Ireland's Eye*. La côte, à partir de Howth, s'incline vers le NO, puis rapidement au nord. L'influence des vents dominants du NE a été fatale; elle a ramené et accumulé les sables dans l'angle formé par le môle ouest du port avec la côte, ce qui devait arriver. La disposition de l'entrée par des fonds de 3,50 *m* seulement est telle que les sables ont pu facilement y pénétrer; aussi le bassin est-il absolument comblé et ne sert-il guère qu'à un petit nombre de bateaux de pêche.

Ijmuiden. — Le canal qui relie Amsterdam à la mer du Nord se termine à Ijmuiden dans un avant-port composé de deux môles partant de terre, espacés de 1200 mètres et convergeant l'un vers l'autre, de sorte qu'au bout de 1 200 mètres ils ne s'écartent que de 600 mètres; ils s'inclinent là encore plus, jusqu'à devenir rectangulaires. Chacun de ces nouveaux alignements a une longueur de 345 mètres et est raccordé au premier tronçon des môles par une courbe de 150 mètres de rayon. Les musoirs atteignent les fonds de 8 mètres et l'entrée mesure 260 mètres.

La surface enclose est de 120 hectares; la mer marne à Ijmuiden de 1,60 *m*; la durée du flot est de 4 heures 15, celle du jusant de 7 heures 54. C'est donc dans une marée un volume de près de 2 millions de mètres cubes qui entre et sort de l'avant-port, mais le jusant étant très long, la vitesse de sortie est faible et ne saurait constituer un élément de chasse.

Les vents régnants varient du nord-ouest au sud-ouest, les premiers sont les plus violents; tous viennent de la mer et par conséquent ont une action sur les vagues. N'ayant pas de données sur leur vitesse relative, il est impossible de déterminer la résultante générale, mais on peut la déduire de ce fait que la plage, après la construction des môles, s'est engraissée de chaque côté, un peu plus au nord; les vagues doivent donc battre le rivage presque normalement, avec une faible inclinaison vers le sud; nous savons d'ailleurs déjà que sur cette portion de la côte les fleuves ont leur embouchure déviée dans ce sens.

Dans ces conditions, le mouvement latéral des alluvions sur le littoral est très réduit. Les sables viennent surtout du large et le régime de la plage n'est pas stable; selon la prédominance des vents pendant certaines périodes, on constate des changements contradictoires dans les sondages. Nous avons plusieurs plans de sondages des environs d'Ijmuiden : (cartes de 1864, 1878, 1883 et 1889, ainsi que celles de 1892, 1895 et 1898, les dernières dues à l'obligeance de M. l'Ingénieur en chef du Waterstaat van Hooff.) La première est antérieure à la construction des môles; la seconde a été levée immédiatement après leur établissement. On voit, par la comparaison des trois premières, que la laisse de basse mer a reculé de 130 mètres de 1864 à 1878 et de 100 mètres de 1878 à 1883. Les courbes de niveau ont été déplacées vers le large sur 1 200 mètres de largeur; mais de 1883 à 1898, on constate plutôt une avance de la mer; une partie du sable d'abord déposée a été enlevée.

Ces faits semblent s'expliquer. Avant la construction des môles, la plage où se trouve Ijmuiden était sujette à l'érosion; les sables marchaient du nord au sud et *vice versa* suivant les vents, mais sans se cantonner en un point, ce qu'ils ont pu faire plus tard à l'abri des môles. Cette accumulation était plus rapide que l'érosion, qui est très lente. Mais les sables de la mer ne sont retroussés sur le rivage que jusqu'à une certaine profondeur. Les vagues ne sont jamais très élevées sur la côte de Hollande, elles ne peuvent donc remuer les alluvions que sur une hauteur limitée.

Il est possible que les quantités qui pouvaient être rejetées sur le rivage et dont une grande partie provenait, sans nul doute, des déblais intérieurs aux môles qui n'ont pas été portés assez loin en mer, il est possible que ces quantités soient épuisées et que l'érosion devienne prédominante. Dans ce cas, ce serait non contre l'ensablement, mais

contre le déchaussement qu'il faudrait dans l'avenir défendre les môles d'Ijmuiden.

Le plan de sondages des abords que nous donnons (planche III, fig. 2) montre l'influence favorable de la direction des branches extrêmes des môles. Les vagues du NO et du SO qui viennent les frapper ont une de leurs composantes dirigée vers la terre, de sorte que les extrémités des môles sont dégagées, ce qu'indique la direction des courbes de niveau. On voit enfin, que grâce à cette inclinaison, il n'y a pas de ressac dirigé devant l'entrée. On devra donc, dans le projet d'un port établi dans des conditions analogues, bien se garder de dessiner la tangente aux extrémités des môles perpendiculaire à la direction des vagues.

A Kingstown, les môles se recourbent de façon à devenir parallèles à la côte ; mais là, les lames passent parallèlement au rivage, de sorte qu'il n'y a pas choc, tandis qu'une semblable disposition aurait été fâcheuse à tous les points de vue à Ijmuiden.

Comme les sables viennent du large, ils devaient entrer dans l'avant-port et c'est ce qui est arrivé ; il y pénètre surtout beaucoup de vase. La vase est le produit ultime de la décomposition des roches ; or, il faut se rappeler que le sable de la côte belge et hollandaise provient en partie de la désagrégation des galets de nos côtes ; là sur le littoral de la Hollande septentrionale, il est au terme du long voyage effectué et cela explique la grande proportion de vase qui s'y rencontre.

Les apports étaient tels que, tandis que la prévision des dragages nécessaires pour donner à l'avant-port une profondeur de 7 mètres ne montait qu'à un million et demi de mètres cubes, on en a dragué 4 millions et demi sans arriver à la cote voulue. On a renoncé alors à entretenir la profondeur dans toute l'enceinte, et l'on n'a plus entretenu qu'une passe de 250 mètres de largeur, mesurant 30 hectares. Pour la maintenir à la cote — 7 mètres, on drague chaque année environ 400 000 mètres cubes, volume qui correspond à un dépôt annuel de 1,30 *m* de hauteur. Ce dépôt provient uniquement de la mer, suivant les analyses. Il est probable, d'ailleurs, que cette hauteur considérable n'est pas la même sur la partie non draguée, car les apports tendent à se précipiter dans les portions profondes.

HAPITRE XV

PORTS SUR PLAGES DE SABLE

L'établissement d'un port sur une plage de sable est une entreprise périlleuse. Près des ouvrages de protection de l'entrée, si la lame frappe normalement le rivage, elle peut affouiller le sable, le transporter au large, puis le ramener sur la côte, sans qu'il en pénètre des quantités notables dans le chenal. Si au contraire l'action de la vague est oblique, le sable s'accumule dans l'angle au vent de l'ouvrage et le rivage s'avance peu à peu en mer, en dessinant une courbe concave vers le large.

On a vu que la profondeur d'action des vagues est très variable et dépend de la situation plus ou moins exposée de la localité, mais leur effet sur le rivage est quelquefois hors de proportion avec cette profondeur. Ainsi à Rosslare, sur la côte orientale d'Irlande, où la mer n'agit pas sur les fonds situés au-dessous de 3 mètres, on a vu dans une tempête 20 000 tonnes de sable enlevées sur une longueur de 400 mètres entre les laisses de haute et basse mer et transportées sur le rivage du nord.

Il ne suffit pas, pour que les matériaux d'alluvions ne puissent entrer dans le chenal, que les musoirs soient primitivement plantés dans des profondeurs soustraites à l'action de la vague, car par suite de l'avancement du rivage les profondeurs diminuent et les musoirs peuvent en définitive se trouver à sec, tout au moins celui du môle ou de la jetée au vent.

Le contraire peut d'ailleurs se produire aussi dans certaines conditions. Si, par exemple, la direction des lames est celle de la bissectrice de l'angle formé par un môle avec la côte, elles tendront à repousser les alluvions vers le sommet de l'angle et à les y broyer. Le sable sera transformé en vase que les courants de retour entraîneront au large ; le rivage n'avancera donc guère ou pas du tout.

Parfois même l'action de la vague, prenant le môle presque dans sa

direction, refoule le sable vers le rivage ; il est facile de se rendre compte de cet effet par la figure 2 de la planche III où l'on voit les courbes de niveau reculer vers la terre devant Ijmuiden. C'est également le phénomène qui s'est passé à Madras.

Mais si les apports sont considérables et la direction de la résultante des vents défavorable, l'implantation des musoirs dans les grandes profondeurs n'est pas un obstacle dirimant à l'entrée du sable dans le chenal. On en a eu un exemple au port de la Pointe des Galets, à l'île de la Réunion.

Port de la Pointe des Galets. — Le port a été établi près de l'extrémité d'un promontoire formé de sable mêlé de pierres provenant des apports de la Rivière des Galets, immense torrent qui débouche à quelques kilomètres au sud.

Tant qu'aucun obstacle n'a été élevé sur la côte, les apports, qui marchent vers la Pointe poussés par les vagues du SE passaient sans être retenus et allaient augmenter la longueur du promontoire ; mais la mer étant là très profonde, ces phénomènes se produisaient avec une extrême lenteur ; on en avait conclu que le rivage était immuable et cette considération fit choisir ce point pour l'établissement d'un port.

Il y avait une autre raison : le lit de la mer y est très accore, les fonds de 25 mètres se trouvant à 125 mètres de la terre ; à 100 mètres on rencontrait ceux de 12 à 15 mètres. On espérait donc que le sable et les galets, déplacés par les ras-de-marée, tomberaient dans les grands fonds et ne pénètreraient pas dans le chenal.

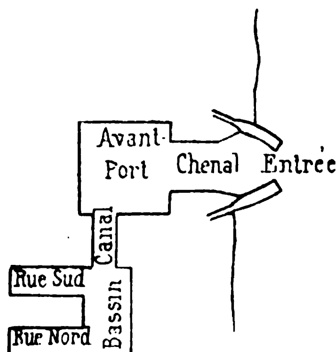


Fig. 93. — Port de la Pointe des Galets (Réunion) 1/20000.

L'entrée (fig. 93) a été délimitée par deux môles en arcs de cercle de 100 mètres de longueur, atteignant les fonds de 12 mètres au moins. On

commença par celui du sud ; mais à mesure de son avancement, il était suivi et dépassé par les apports que poussaient les lames. Aussi les blocs extrêmes ne furent-ils posés que sur des fonds de 5 à 6 mètres au lieu de 12 ou 15 trouvés dans les sondages primitifs. L'autre môle, au contraire, protégé par le premier, a pu être établi sur le fond naturel.

Les sables et les galets sont projetés avec violence par les lames contre le musoir du môle sud. Ces chocs répétés désagrègent peu à peu les blocs construits en béton. En 1895, trente mètres, près du tiers de la longueur, avaient disparu dans la partie supérieure ; les blocs du fond, enterrés, ont été préservés.

On a dû en 1896 recharger le môle avec de nouveaux blocs, mais on ne l'a fait que sur une longueur de 10 mètres. Le rivage s'est avancé jusqu'à l'extrémité du tronçon de 80 mètres et la dépasse même parfois.

Les apports contournent le môle sud et se déposent en général sur une longueur de 250 mètres dans le chenal et l'avant-port ; il a fallu extraire :

En 1894. . . .	125000 tonnes
1895. . . .	209000 »
1896. . . .	105000 »

soit une moyenne de 146000 tonnes par an [1].

Théorie de Cornaglia. — Nous devons mentionner ici la théorie qui guide aujourd'hui les ingénieurs italiens dans leurs travaux. Elle est due presque en totalité à Cornaglia.

Le mouvement orbitaire des vagues se réduit au fond de la mer, on le sait, à un mouvement rectiligne en avant et en arrière. Cornaglia a donné à ce mouvement alternatif le nom de *flot de fond*, et c'est à lui qu'il attribue la marche des alluvions. Le mouvement en avant, c'est-à-dire vers le rivage, est plus prononcé que celui rétrograde, et la composante du poids des matériaux, parallèle au fond, diminue et peut même annuler la prédominance d'un des effets sur l'autre.

Les points où à cause de cette composante les deux flots, direct et de retour, se balancent exactement, constituent une *ligne neutre*, dont la position varie avec la hauteur des ondes, la disposition des lieux, le poids des matériaux. Dans la Méditerranée elle se tient à une profondeur de 8 à 10 mètres.

Pour qu'un estuaire ou un chenal maintiennent leurs profondeurs,

(1) Ces renseignements sont dus à l'obligeance de M. J. Bertho, capitaine du port.

il faut donc que l'embouchure ou l'entrée du chenal soit reportée au delà de la ligne neutre. C'est ce qui a eu lieu aux môles de la Tees, de la Tyne, de la Liffey, de Malamocco et du Lido, de Sulina, du Mississipi, qui n'ont pas été contournés par les alluvions.

La théorie revient à énoncer ce fait connu qu'il faut reporter l'extrémité des ouvrages de protection dans les grands fonds ; il est même impossible de dire « au delà de la ligne neutre » car il n'est aucun moyen de déterminer cette ligne.

Ce qui a été dit ci-dessus de l'avancement des plages démontre que la position de la ligne neutre ne saurait être immuable ; l'exemple de Malamocco lui-même le prouve aussi. Tant que le sable a pu passer entre les interstices des môles, il tombait dans le chenal d'où le courant le portait à la mer ; l'accumulation n'a pu se produire.

Mais en 1888 on a rendu les môles imperméables par un revêtement de menues pierrailles ; depuis lors, la laisse du rivage s'avance en mer et l'on prévoit le moment où il faudra recourir au moyen suprême, l'allongement des môles.

Il est possible, d'ailleurs, que vu la très faible quantité de sables en mouvement sur cette côte, on arrive alors à maîtriser complètement l'avancement ; mais il est fort peu probable qu'on réussirait de même sur une plage comme celle de Dunkerque, et l'expérience n'est pas pour le faire espérer.

Remarquons d'ailleurs que s'il existait réellement une ligne neutre bien déterminée, telle « que les matériaux situés en-deçà sont rejetés vers la terre et ceux au delà vers la mer » il devrait se dessiner le long de cette ligne une tranchée qui la ferait reconnaître et qui n'existe pas.

Les études de Cornaglia ont eu du moins le mérite d'appeler plus encore l'attention sur la nécessité de porter en eau profonde les musoirs des ouvrages de protection. Il se peut que des études suivies dans ce sens conduisent à des résultats utiles.

MOLES A CLAIRE-VOIE

Pour éviter les ensablements, les anciens construisirent des môles à claire-voie dans les baies de Pouzzoles, Misène et Tarente. Celui de Pouzzoles, dont les restes sont en voie de restauration, avait 385 mè-

tres de longueur ; il se composait de piles carrées dont le côté variait de 8,60 *m* près de terre jusqu'à 15 mètres au musoir. Les vides, larges de 10 mètres, étaient recouverts d'arceaux en plein cintre construits en briques plates et dont la naissance commençait au niveau de la mer. Son apparence lui fit donner le nom de *Pont* de Caligula.

Quel but se proposaient les Romains ? Pensaient ils que le courant littoral passerait sans obstacle à travers les môles et le bassin, entraînant les sables sans leur permettre de se déposer ? Voulaient-ils au contraire laisser pénétrer les lames par les claires-voies et entretenir ainsi dans la darse une agitation capable d'empêcher le dépôt des alluvions ? Cette agitation était, paraît-il, assez forte, car on fut obligé de prévoir la fermeture des vides par des madriers pendant les gros temps.

A Misène, on doubla les môles en faisant correspondre les vides de l'un aux pleins de l'autre.

Mais quant au résultat désiré, il fut négatif, et il ne pouvait en être autrement. Ecartons l'hypothèse, trop longtemps admise, de l'effet unique du courant littoral, sur la marche des alluvions. Quant aux vagues, elles pouvaient bien entrer et gêner les opérations des navires le long du môle, mais non déterminer le maintien des profondeurs.

Comment les lames, dont la violence était certainement réduite par les piliers des môles, auraient-elles pu expulser les sables ? Le certain, c'est que tous ces ports se comblèrent rapidement ; deux successivement créés à Antium eurent le même sort, et l'on songea alors à y créer en pleine mer un abri relié à la terre par un pont.

Le port de Nisida, construit dans l'île du même nom, sur le canal large de 450 mètres qui la sépare de la terre ferme, était aussi abrité par deux môles à claire-voie de 450 mètres de longueur. L'ingénieur napolitain de Fazio, grand partisan du système, restaura ces môles au commencement du siècle, mais on dut plus tard fermer les vides, à cause de l'agitation ressentie dans le port. Celui-ci, d'ailleurs, ne pouvait se combler, car Nisida a certainement été séparée de la terre ferme par la mer, qui continue dans le canal son action excavatrice.

Au Portel, près de Boulogne, l'anse est protégée par un môle de 140 mètres de longueur qui avait été projeté avec charpente à claire-voie comme dans tous les ports de ce littoral. Réellement on l'a composée : d'une fondation de 80 *cm* d'épaisseur, établie dans une marne noire compacte ; d'un soubassement de 50 *cm* d'épaisseur et de deux étages de blocs de maçonnerie de 3 mètres de hauteur chacun. Les blocs de

l'étage inférieur laissaient entre eux des ouvertures d'un mètre, espacées de 4 mètres d'axe en axe. Ce môle, étant trop court, n'exerçait aucune influence sur le mouvement des sables; mais on fut obligé de fermer plusieurs des ouvertures pour diminuer l'agitation sur la plage d'échouage.

Regi Lagni. — On connait en France sous le nom de système du Regi Lagni un procédé employé par l'ingénieur napolitain Afan de Rivera à l'embouchure de plusieurs petits fleuves d'Italie (Regi Lagni, Regia Agnena, Sarno, etc.). Il est constitué par un chenal un peu moins large que le lit du fleuve à l'embouchure, et qui le continue à une certaine distance dans la mer. Ce chenal est délimité par deux files de pieux espacés d'un mètre, et dont les têtes réunies par des moises sont arasées au niveau des basses mers.

Voici, d'après Rossi, l'effet produit par ces jetées à jour :

« Les vents de tempête et les vagues piochent le fond de la mer, en rompent les bas fonds, et poussent les sables au rivage ; ainsi se forment les hautes plages et les dunes. Là où celles-ci sont interrompues par les embouchures, se forment les bancs qui empêchent l'écoulement. Quand à l'embouchure on établit une palissade submergée à jour, le mouvement déterminera des tourbillons; et les grands cônes verticaux renversés du système de tous ces tourbillons piocheront vigoureusement le fond, dans l'espace entre les pieux et les abords. Ainsi l'obstacle que la bourrasque jette contre l'embouchure en est instantanément enlevé par le mouvement simultané des tourbillons ; à l'instant même que le courant va être empêché, il sort avec vitesse à travers les pieux, et emporte les sables au large malgré les vagues. Si la bourrasque enfile l'embouchure, les excavations se feront également des deux côtés ; si elle est oblique, elles seront plus considérables du côté battu par les vagues, où se déterminera le fil du courant. Donc les causes qui tendent à être un obstacle au débit le facilitent et même le provoquent, puisque les bancs sont enlevés.

« Une jetée à claire-voie submergée réussit à maintenir le fond excavé — ou non. Si non, inutile de la faire ; mais si elle est efficace, il faut l'interner dans la mer jusqu'à la profondeur qu'on veut acquérir. Si un fleuve débouchait non sur une plage douce, mais profonde, les palissades seraient inutiles ; il faut en tout cas dépasser les bancs ».

Le système a été abandonné en Italie depuis longtemps, mais ré-

cemment encore M. le professeur Gaetano Bruno a tenté de le remettre en honneur.

CONSTRUCTION EN PLEINE MER D'UN ABRI RELIÉ A LA TERRE PAR UN VIADUC SUR PILES

On pensait laisser ainsi aux courants leur libre action de transport au milieu des colonnes du pont. Ce système a été proposé par Vetch en 1846 pour Douvres et par Dupuy de Lôme et Scott Russell pour la création d'un port devant Calais.

Rosslare (fig. 94). — On a commencé un port de ce genre à Rosslare, au sud de la côte orientale de l'Irlande, dans la baie de Balligeary. Une digue de 300 mètres de longueur devait y être installée en pleine mer par des fonds de 5 à 7 mètres et être reliée à la terre par un viaduc long de 300 mètres, composé d'un tablier métallique porté sur 24 piles en béton. On n'a construit de la digue que

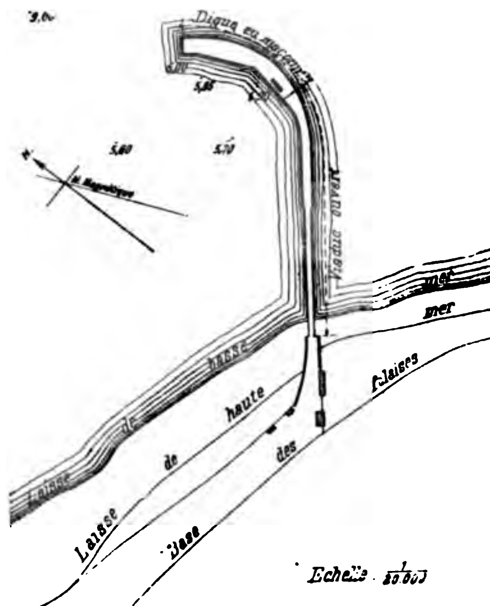


Fig. 94. — Port de Rosslare.

90 mètres, de sorte que l'abri qu'elle procure est insuffisant et que son action sur la plage, d'ailleurs peu sablonneuse, a été nulle.

M. Mann, l'Ingénieur distingué qui a bien voulu nous envoyer les renseignements sur cet établissement ajoute : « Il n'y a eu aucune accumulation de sable ni d'autres matériaux et la profondeur du port est restée absolument la même. Le port de Rosslare peut être considéré comme probablement l'exemple du plus grand succès de la construction d'un bon port sur une plage de sable. Le vent dominant est du nord-ouest et le port en est bien abrité par les falaises voisines. Rosslare est tête de lignes de vapeurs allant de Liverpool à Bristol. »

L'expérience n'est pas absolument concluante, et l'ouvrage rentre presque dans la catégorie des appontements construits sur les côtes.

Calais (fig. 95). — Le port devait être circulaire et avoir 300 mètres de diamètre. L'entrée était tournée vers la terre, pour éviter les grandes vagues. Trois appontements y étaient prévus pour les navires. Un viaduc sur pilotis reliait le port circulaire au rivage et aux voies ferrées

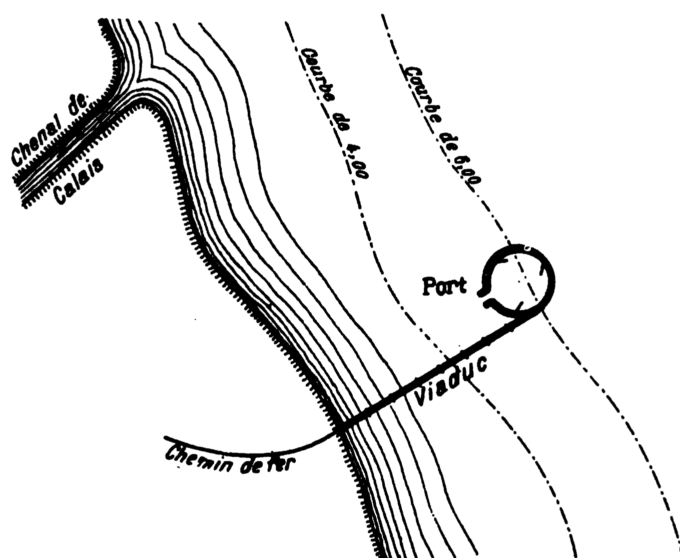


Fig. 95. — Port en mer à Calais. Projet Dupuy de Lome et Scott Russell.

Cette création, on le voit par la figure, n'aurait certainement eu aucune influence sur le régime des sables, vu son éloignement. La guerre de 1870 a arrêté le projet et l'on doit s'en féliciter. On a depuis lors donné satisfaction aux passagers entre la France et l'Angleterre

dans de meilleures conditions, dont l'élasticité se prête aussi davantage au progrès.

Algoa-Bay (fig. 96). — Sir John Coode a proposé pour Algoa-Bay, sur la côte sud-est du Cap, un port construit d'après les mêmes idées. Un viaduc formé de pieux en fer distants de 9 mètres, supportant des longrines pour la pose d'une double voie ferrée, devait s'avancer sur 900 mètres de longueur jusqu'aux fonds de 11 mètres. Une digue presque parallèle au rivage, faisant avec le viaduc un angle de 110° et longue de 800 mètres, protégeait un bassin avec deux

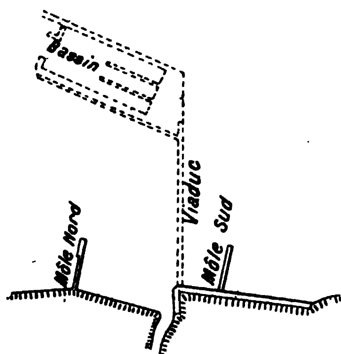


Fig. 96. — Port projeté à Algoa-Bay.

traverses. Ce port n'a pas été construit; mais à la demande du gouvernement, le projet avait été étudié et approuvé par deux sommités scientifiques, sir John Hawkshaw et Brunlees.

Eût-il réussi? D'après les observations faites par M. Shield, la marche du sable se fait sur ce rivage du sud au nord; cependant avec les vents de l'ouest l'alluvion s'accumule sur la plage et encore plus avec les vents du nord et du nord-est qui contrarient l'action des lames venant du sud-est. Le mouvement des sables ne s'étend pas au delà de l'action des vagues et est facilement arrêté par tout obstacle. Certes, l'éloignement de terre de la digue était de nature à faire espérer que l'action des lames n'aurait pas été modifiée; mais en si délicate matière, l'appréhension eût été légitime.

Ceara. — A Ceara, sur la côte du Brésil, entre le cap San Roque et l'embouchure de l'Orénoque, le vent et la vague viennent de l'est et poussent vers l'ouest l'immense volume de sable qui chemine sur ce

rivage. Sir John Hawkshaw, l'ingénieur maritime le plus réputé de l'Angleterre, y a construit un abri dont l'enracinement à terre consiste en un pont en fer de 225 mètres de longueur, normal au rivage. De l'extrémité part une digue en maçonnerie recourbée à un angle à peu près droit avec le pont et longue de 500 mètres. L'ensablement a été presque immédiat et a vite atteint l'extrémité de la digue, de part et d'autre (fig. 97). La digue, pour être si près de terre, avait une trop grande longueur pour qu'on pût espérer que le mouvement des sables ne serait pas altéré.

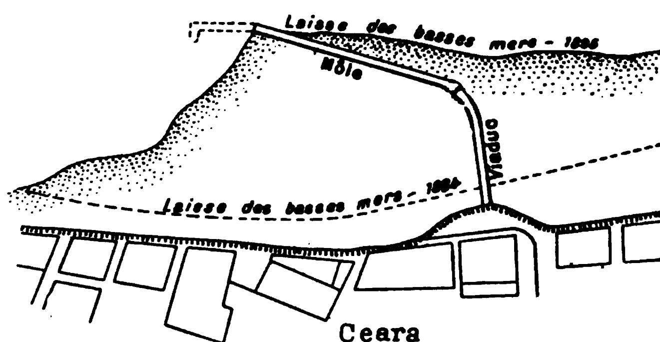


Fig. 97. — Môle de Ceara.

Il est à craindre que l'ingénieur, malgré son grand talent, se soit laissé influencer par l'idée que les courants littoraux ou de marée entraineraient les alluvions, n'étant pas interceptés par le pont métallique. Ce sont les vents, ce sont les lames qui *presque toujours* sont l'agent de la marche des sables, on ne saurait trop le répéter. Sir John Coode s'exprimait ainsi à ce propos devant l'Institution des Ingénieurs civils de Londres :

« Je suis surpris de voir combien est générale cette confusion entre l'action des courants de marée ou littoraux et les courants engendrés par l'action des vagues. J'y suis revenu devant la Société à maintes reprises. Je répète qu'un fort vent de vingt-quatre heures apporte plus de changement dans les conditions des plages et des bancs de sable qu'un temps ordinaire de vingt-quatre mois. Il faut toujours avoir présent à l'esprit, comme une règle, que ces changements sont dus non aux courants de marée, mais à ceux engendrés par l'action des vagues.... L'action des vagues est cent fois plus forte que celle de la marée. »

PORTS A JETÉES

Les plages sablonneuses de la mer du Nord et de la Manche sont plates ; l'estran y occupe une largeur variable mais toujours considérable ; les grandes profondeurs se trouvent à des distances presque inaccessibles à des ouvrages de protection.

On y rencontrait primitivement sur certains points les estuaires de petits fleuves ou de lagunes. La marée, qui varie depuis 7 mètres au Havre jusqu'à 4,60 *m* à Ostende, envahissait ces réservoirs pendant le plein et les petits bâtiments de l'époque y pénétraient avec elle ; ils s'échouaient à mer basse dans le bassin intérieur. Le courant déterminé par le jusant suffisait à entretenir dans le chenal d'accès la faible profondeur nécessaire.

Telle est l'origine des ports de ce littoral. Dunkerque et Calais se sont établis dans les wateringues de l'Aa, Boulogne sur la Liane, Dieppe sur l'Arques, etc. Ostende doit son essor maritime à une coupure pratiquée de main d'homme, en 1445, dans les dunes qui isolaient de l'Océan les wateringues de Wautermann.

Mais les bassins se colmataient peu à peu par les apports de la mer et des canaux intérieurs, par les empiètements des riverains. L'effet des *chasses* naturelles diminuait et les alluvions se déposaient dans le chenal où elles rencontraient un repos relatif. D'autre part, à peine sorties de l'embouchure, les eaux s'étalaient sur la plage et perdaient la majeure partie de leur énergie. Elles y dessinaient un lit tortueux. Pour le redresser et le rétrécir afin d'augmenter la vitesse d'entraînement, on le traita comme une rivière et on le borda de deux jetées parallèles.

Lorsqu'un obstacle se dresse sur le chemin d'alluvions mobiles, elles s'accumulent contre la face d'amont, c'est-à-dire située du côté d'où elles proviennent. Devant les ports français de ce littoral, les sables marchent vers le nord ; la présence d'une jetée détermine donc au sud un amoncellement. La laisse de basse mer s'avance peu à peu vers le large ; les alluvions finissent par déborder l'obstacle et se précipiter devant le chenal. Cet effet est beaucoup moins marqué aux ports belges, surtout à Ostende, et nous avons essayé d'en donner la raison dans le chapitre X, page 110. C'est que là la mer bat en côte et que les sables proviennent moins de la plage, qui est presque invariable, que du lit même de l'Océan.

Jetées basses et hautes. — Jadis on attribuait surtout aux courants littoraux le mouvement des alluvions ; l'idée vint donc naturellement de réduire au minimum l'obstacle apporté à leur propagation ; on retint les sables de l'estran par une jetée pleine, en enrochements ou en fascinages, à faible saillie sur la plage.

On espérait que les courants passant par dessus ces jetées entraîneraient la majeure partie des matières en suspension. En réalité, les jetées basses, qui ne dépassaient guère de plus d'un mètre le relief du sol, étaient vite débordées par le sable ; elles ne procuraient aucune tranquillité au chenal et constituaient un écueil qu'indiquaient mal, et de jour seulement, des balises ou des bouées. Les navires entraient un peu au hasard, et leurs manœuvres ne pouvaient être aidées de terre.

On dut construire des jetées hautes, insubmersibles, par dessus les jetées basses ; mais sous l'empire de la même préoccupation, on les établit à claire-voie. Longtemps on conserva basse la jetée sous le vent ; enfin, le type complet se composa de deux jetées parallèles se prolongeant jusqu'à l'extrémité de l'estran et constituées chacune par une base pleine surmontée d'une charpente à jour.

Les jetées sont construites sur la plage elle-même et la profondeur primitive est égale dans le chenal et à l'extérieur ; mais les chasses, le mouvement des navires, les excavations opérées de main d'homme ou mécaniquement maintiennent ou augmentent la profondeur entre les claires-voies, tandis que les abords s'encombrent, non seulement par les nouveaux apports dont une partie se dépose au vent, mais encore par le produit même des chasses.

Les alluvions qu'elles rejettent en mer sont constituées par de la vase ou du sable ; la première reste aisément en suspension et peut être emportée au loin par le jusant ; une portion va tomber dans les grands fonds d'où elle ne sort plus ; une autre, revenue avec le flot, est jetée sur le littoral ou rentre dans le chenal.

Quant au sable, plutôt roulé sur le fond, il s'arrête aussitôt que le courant n'est plus capable de le pousser.

Sur le littoral de la Manche et de la Mer du Nord, le jusant se dirige vers le sud-ouest ; c'est donc de ce côté que s'arrête le sable qui contribue aussi par conséquent à l'engraissement de la plage au vent. La laisse de basse mer recule et la tendance des alluvions à déborder devant le chenal augmentant sans cesse, les chasses, dont le volume diminue avec le comblement des bassins intérieurs, finissent par devenir impuis-

santes à le déblayer. Le remède paraît naturel : on allonge les jetées. Seulement, l'amélioration n'est que de courte durée; les mêmes phénomènes se reproduisent et l'on est acculé à un nouvel allongement.

Un jour arrive où il faut s'arrêter.

Telle a été l'histoire de nos ports français du nord. Le système des jetées parallèles ayant été appliqué aux plages de galets, où l'on a à lutter contre un envahissement analogue, l'étude suivante s'applique aux deux cas.

Entrée et orientation des chenaux. — Lorsque furent créés les ports en question, la navigation à vapeur n'existait pas et il fallait se plier aux exigences des bâtiments voiliers; l'orientation des chenaux devait être telle que les navires pussent y entrer aisément; on ne se préoccupait pas de la sortie, car les bâtiments abrités et peu pressés pouvaient attendre les circonstances favorables à leur départ. L'angle maximum que les jetées faisaient avec les vents dominants était de 67° 30′, inclinaison des voiles à l'allure du *plus près*.

En ne tenant compte que de la durée des vents, nous avons vu que les dominants sur cette côte sont ceux du SO. Or, l'orientation de tous les chenaux, de Boulogne à Ostende, est à peu près celle du NO. Ce n'est certainement pas là une simple coïncidence. Le fait prouve que les Ingénieurs ont tenu compte dans leurs projets de la violence des vents, qui portent au NO la résultante générale.

Aucun chenal n'est d'ailleurs enfilé directement par le vent, ce qui y aurait déterminé une agitation fâcheuse; ils sont tous inclinés plus ou moins sur sa trajectoire. D'après Minard, la meilleure orientation est celle que présente l'entrée de l'Adour : elle fait un angle de 12° avec le vent dominant.

Aujourd'hui, la question de la manœuvre à l'entrée a perdu beaucoup de son importance, car les voiliers, dont le nombre diminue chaque jour, se font remorquer. On ne devrait donc plus guère avoir égard qu'à la tranquillité du chenal ; cette condition réalisée, il y aurait avantage à gagner au plus tôt les grandes profondeurs. On serait ainsi conduit à couper normalement les lignes de niveau.

Forme du chenal. — L'entrée d'un port à jetées parallèles est difficile durant les mauvais temps ; les navires, même les plus petits, préfèrent parfois attendre en mer que de s'exposer à être brisés contre

les ouvrages de protection. Bien que la houle et la hauteur des vents ne dépendent, près de terre, que de la forme du rivage, il paraît résulter d'observations faites à Dieppe et à Fécamp que les jetées ont une influence marquée sur leur intensité. On croyait autrefois remédier à cet inconvénient en donnant au chenal une forme courbe, qui amortirait les lames. Nous avons toujours observé, au contraire, que les parties curvilignes guidaient et conservaient mieux les ondes que les parties droites. Les Italiens pour arrêter la propagation des lames composent leurs môles d'abri de segments rectilignes brisés ; mais le procédé n'est pas décisif non plus.

Les courbures étant au moins inutiles, la forme droite s'impose comme étant la plus commode pour les navires. Dans nos ports, les jetées affectent parfois des directions diverses sur leur longueur ; cela provient surtout des allongements successifs qu'elles ont reçus.

La même raison explique pourquoi les jetées ne sont pas toujours parallèles, pourquoi les largeurs ne sont pas uniformes. En Belgique, à Nieuport, Blankenberghe et surtout Ostende, le chenal s'évase à la sortie. Dans ce dernier port, l'évasement atteint **160** mètres entre les musoirs, tandis que la distance entre les jetées n'est que de **110** à **120** mètres dans le reste de leur étendue. La manœuvre des navires est facilitée par cette disposition ; mais Ostende est en partie abritée par les bancs parallèles à la côte qui gisent devant sa rade. Autrement, on eût sans doute éprouvé à la partie rétrécie le ressac qui agitait jadis les chenaux du Havre, de Dieppe, avant qu'on n'eût rendu leur largeur uniforme. La disposition n'est donc pas à recommander.

Au contraire, les jetées doivent s'élargir à leur extrémité intérieure pour se raccorder avec l'avant-port, afin de faciliter les manœuvres.

Largeur du chenal. — Dans un chenal à largeur uniforme, la houle se propage d'une extrémité à l'autre en conservant la même hauteur. En arrivant dans l'avant-port, qui représente l'ancienne lagune intérieure, la vague s'étale et s'abaisse, comme dans une baie à goulet. L'abaissement n'est pas proportionnel à la différence de largeur entre le chenal et le bassin, mais il y a entre ces quantités une relation évidente. Les avant-ports étant limités, il importe donc de réduire autant que possible la largeur entre les jetées, pour assurer la tranquillité intérieure. D'autre part, cette largeur doit être suffisante pour les besoins du port et être en proportion des navires qu'il reçoit. Jus-

qu'en 1847, le chenal du Havre, qui mesurait 75 mètres de passage à l'entrée, n'offrait que 32 mètres au droit de la tour Vidame; cette dimension a été successivement augmentée et aujourd'hui elle est uniformément de 100 mètres. On a dû, en conséquence, doubler la superficie de l'avant-port pour atténuer l'augmentation de houle résultant de l'élargissement du chenal, et l'on n'y est parvenu qu'en partie.

C'est à cette largeur, 100 mètres, qu'on a borné les chenaux nouvellement remaniés de nos ports français, sauf Dunkerque (120 mètres). Elle est un peu plus grande à Ostende, comme on l'a dit ci-dessus.

Longueur des jetées. — En principe, les jetées ne doivent avoir que la longueur nécessaire pour dépasser l'estran; mais les allongements successifs qu'elles ont reçus leur ont donné dans différents ports les longueurs suivantes :

Dunkerque. . . .	800 mètres	Fécamp	320 mètres
Calais	763 »	Le Havre. . . .	240 »
Boulogne	650 »	Ostende	450 »
Dieppe	600 »		

En général la jetée située au vent, c'est-à-dire à l'ouest et au sud, est plus longue que l'autre. Ce n'est pas seulement pour défendre le chenal contre les alluvions, c'est aussi et surtout pour faciliter la manœuvre des navires. Un bâtiment qui manque l'entrée peut s'éloigner sous le vent — nous parlons du cas où règne le vent dominant — sans risquer de tomber sur l'autre jetée. A la sortie, le voilier halé jusqu'à l'extrémité de la jetée au vent — s'il n'emploie pas le remorqueur — peut également courir sans crainte sa première bordée. A Boulogne, avant la construction du môle Carnot, les navires qui n'avaient pas attaqué le port en rasant au plus près le musoir du SO pouvaient encore être ramenés dans le chenal par le courant de remous qui se produit au nord de la jetée de l'ouest.

A Fécamp les jetées sont à peu près égales. Au port de commerce de Cherbourg, c'est la jetée au vent, celle de l'ouest, qui est la plus courte, de 248 mètres; on a voulu ainsi, paraît-il, favoriser la sortie des navires entrés en relâche à destination de la Manche et qui attendent les vents d'est.

Mais on conçoit que l'inégalité des jetées est préjudiciable aux bâtiments entrant avec les vents contraires; par ailleurs les chasses, qui constituaient autrefois le principal et presque unique procédé d'entretien

des chenaux, s'épanouissent quand elles dépassent la plus courte jetée et c'est justement à l'extrémité de l'autre que s'accumulent les bancs de sable ou de galets qu'on appelle *pouliers*.

Constitution des jetées. — On a continué pendant longtemps, par économie, à n'établir que des jetées basses sous le vent du chenal; même quand on y eut renoncé, on prolongeait souvent ces jetées, devenues hautes, par un épi submersible en enrochements, pour achever de guider les eaux du jusant. A Boulogne, la jetée du NE est continuée, sur 128 mètres de longueur, par une plateforme en pierres smillées, limitée du côté du chenal par une ligne de pieux et palplanches, qui s'avance par le travers du musoir ouest. Au delà, le chenal est encore maintenu par une jetée basse à pierres perdues dont la longueur est de 320 mètres; elle est signalée par une bouée.

Les jetées récemment établies sont composées de deux parties : une inférieure ou seuil, qui n'est autre chose que l'ancienne jetée basse, et une supérieure, superposée, insubmersible.

La partie inférieure ne s'élève guère que d'un à deux mètres au-dessus de l'estran dont elle suit la pente ; elle sert à guider les dernières eaux du jusant.

Ce substratum a généralement une forme arrondie, convexe vers le haut, avec talus égal de chaque côté. Suivant la nature de la plage on exhausse un noyau de sable ou de galets, sur lequel on étend des fascinages ou des moellons ; ces matériaux sont retenus de part et d'autre par des pieux et des palplanches dont le pied est appuyé par une risberme en moellons. Du côté du chenal, cette risberme est établie sur une surface restreinte, pour ne pas obstruer le passage.

Les enrochements supérieurs sont fortement protégés par de grosses pierres à la superficie, car les montants de la superstructure déterminent des ressacs et des tourbillons qui déplacent les moellons ; souvent même on recouvre la partie supérieure de l'enrochement d'une maçonnerie destinée à prévenir les affouillements.

Sur le noyau de sable on dispose parfois une couche d'argile, qui doit également être protégée.

A la nouvelle jetée ouest d'Ostende, de Mey a donné au substratum la forme spéciale représentée par la figure 98.

La jetée basse est formée sur les 400 premiers mètres d'un noyau de sable recouvert d'une maçonnerie de briques dont l'épaisseur

varie de 40 à 70 *cm*. Ce revêtement s'appuie entièrement sur une maçonnerie, également de briques, de 1,20 *m* de largeur sur 1 mètre de

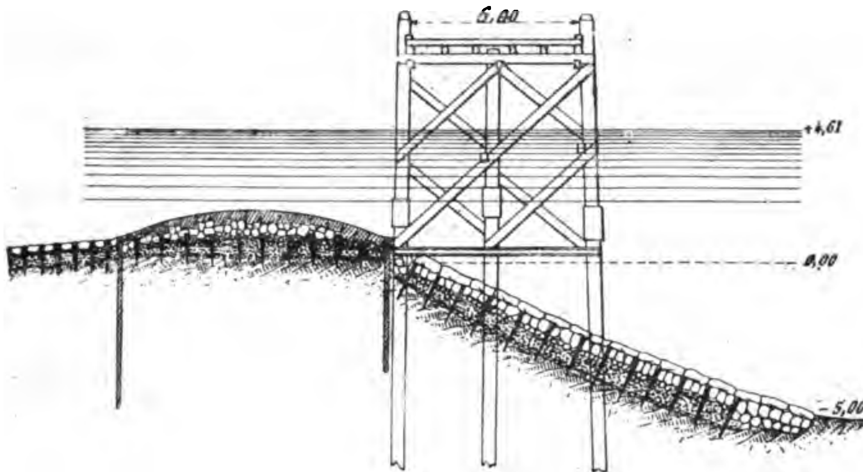


Fig. 98. — Jetée ouest d'Ostende.

hauteur, défendue par un fascinage de 3 mètres de largeur sur 50 *cm* d'épaisseur, lesté de pierres. Du côté du chenal, il est soutenu par une charpente composée de pieux et de palplanches dont la face intérieure est protégée par un massif de béton. Des murettes de renforcement sont établies de sept en sept mètres.

La face supérieure de la charpente est raccordée avec le fond du chenal par un talus en enrochements recouverts de sacs de béton et reposant sur des plateformes en fascinage lestées, composées de pièces de fascines de 8 mètres de longueur sur 40 *cm* de diamètre, placées normalement les unes aux autres en rangées espacés de 45 *cm* d'axe en axe. On superpose à ce cadre des couches de fascines recouvertes d'un cadre pareil qui les enserre. Le tout forme un matelas flexible qui se moule sur le talus du chenal et protège le pied de la jetée basse. Sur ce matelas on bat des piquets de 1,20 *m* de longueur espacées de 90 *cm* et clayonnés de douze brins, de manière que le clayonnage conserve une hauteur de 50 centimètres.

Superstructure. — La superstructure a pour but de permettre l'accès de l'extrémité des jetées pour aider aux manœuvres des navires, de délimiter le chenal et d'y assurer une certaine tranquillité. Primitivement, elle était toujours en charpente et à claire-voie, constituant un pont composé d'un tablier ou tillac porté sur des palées.

Celles-ci ont la forme trapézoïdale et comprennent des montants inclinés, reliés entre eux par des entretoises, des croix de Saint-André ou des pièces obliques dites *bracons*. Le principe de la construction, comme dans toutes les fermes de charpente, est d'assurer la solidité par un canevas triangulaire.

Il importe que les assemblages ne soient pas à tenon et mortaise, car les secousses occasionnées par les chocs des vagues et même des navires produisent des ballottements auxquels on ne pourrait porter remède ; les pièces s'assemblent donc à plats joints, à embrèvements ou par moises avec des boulons aisés à resserrer. Toutes les précautions sont prises pour la conservation des pièces, surtout en cas d'entailles; en outre du créosotage, on les goudronne avec soin.

L'espacement des palées est d'environ 3 mètres d'axe en axe ; l'intervalle qui les sépare est, du côté du chenal, divisé en deux ou trois parties par un ou deux poteaux de remplage ; ils ont pour but, en outre de leur coopération à la solidité de l'ensemble, d'empêcher les petits bateaux ou les pièces saillantes des navires d'être projetés entre les fermes. Au milieu de ces nombreuses charpentes, la lame est d'ailleurs assez brisée pour que le chenal soit relativement tranquille. Les vagues des tempêtes qui, nous l'avons dit, frappent les jetées sous un angle très aigu dans nos divers ports du Nord, les traversent à peu près dans le sens de leur longueur et y dépensent leur énergie.

L'équarrissage des éléments de la charpente est de 30 *cm* ; on voit qu'avec deux poteaux intermédiaires les vides sont réduits à 70 *cm* et avec un seul à 1,20 *m* (Boulogne). On a soin d'appuyer les poteaux de remplage de façon qu'entre les appuis il n'y ait pas plus de 3 mètres de longueur libre.

Les palées trapézoïdales ont leur base supérieure commandée par la largeur du tillac. Cette largeur ne s'écarte pas beaucoup de 3 mètres et mesure dans différents ports :

Dunkerque		2,70 *m*	Le Tréport	2,50 *m*
Calais	jetée est	2,00	Dieppe	3,00
	» ouest	2,20	Trouville	3,00
Boulogne	jetée nord	3,20 à 3,40 *m*	Saint-Nazaire	3,40 à 4 *m*
	» sud	id.		

Le fruit des montants est de $\frac{1}{8}$ à $\frac{1}{10}$; il faut se garder d'une pente excessive. Ces montants reposent sur une semelle horizontale ; ils sont

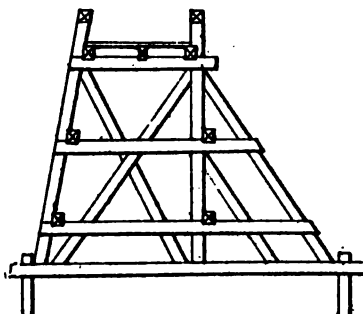
reliés par des croix de Saint-André et par plusieurs rangs de moises. Les fermes sont unies entre elles dans le sens de la longueur par des liernes en quatre ou cinq files suivant la hauteur.

Il faut que toutes ces pièces soient facilement resserrées aux assemblages, et d'une réparation aisée, car les jetées sont des ouvrages à continuellement entretenir et remettre en état.

On doit aussi veiller à ce que dans le chenal aucune saillie de boulons, de moises ne puisse déchirer les œuvres des bâtiments.

La rangée supérieure de moises sert d'appui à des poutres recouvertes d'un plancher en madriers d'au moins dix centimètres d'épaisseur; ces madriers ne sont pas jointifs, afin de faciliter l'écoulement des paquets de mer qui pendant les gros temps balaient le tillac.

La semelle inférieure repose sur une palée composée de pilotis enfoncés dans la jetée basse et réunis par des pièces horizontales; les deux palées supérieure et inférieure sont solidement réunies. Il ne faut pas chercher à supprimer la pièce inférieure en enterrant les montants eux-mêmes de la ferme supérieure ; la partie enfouie en effet se conserve longtemps étant à l'abri des tarets et de la pourriture; on n'a à renouveler que les pièces non enterrées.


Fig. 99. — Jetée avec contrefiches

Les palées sont parfois arc-boutées du côté de l'estran par un système plus ou moins compliqué de contrefiches (fig. 99).

A Ostende, la nouvelle jetée de l'ouest sert en même temps de promenoir ; aussi la largeur en a-t-elle été portée à 6 mètres, et la palée se compose de deux moitiés symétriques ayant chacune les éléments ci-dessus décrits.

Musoir. — L'extrémité de la jetée, ou musoir, doit-être établie beaucoup plus solide, car elle est plus exposée au choc des lames et des avaries. On la construit dans le même système, mais en l'élargissant ; on donne aussi souvent à son tillac une hauteur plus grande, pour que les hommes de veille y soient mieux en sûreté. L'extrémité du musoir se termine en général par un demi-cercle ; elle est rectangulaire au Tréport et semi-hexagonale à la jetée ouest de Calais. La

figure 100 indique le mode de construction du musoir de la nouvelle jetée ouest d'Ostende.

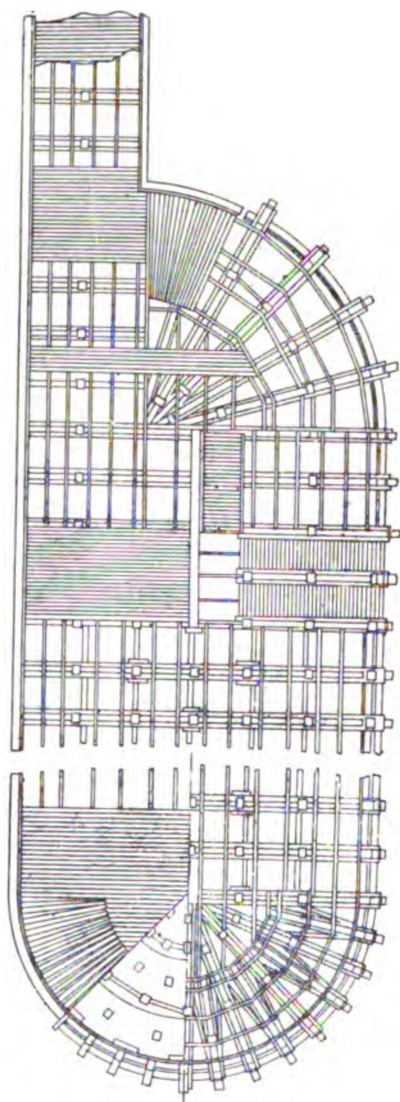


Fig. 100. — Musoir d'Ostende. — Plan.

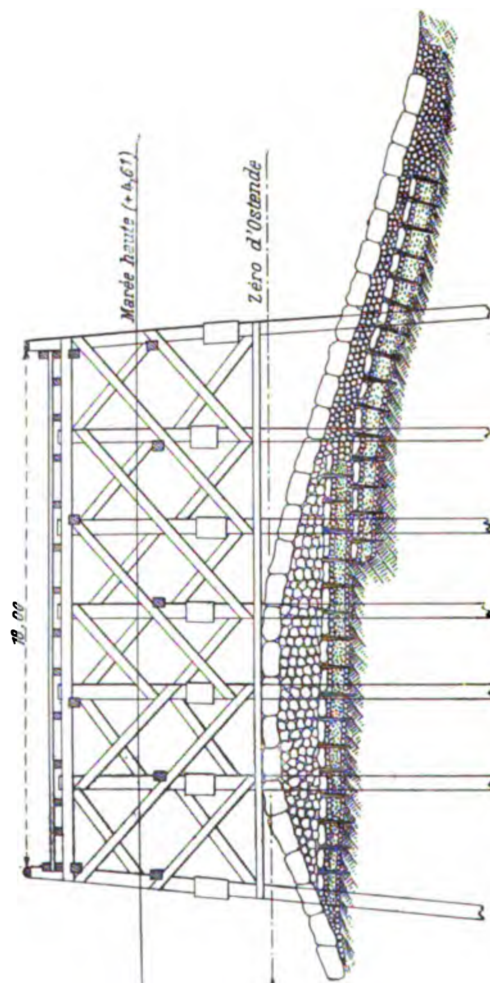


Fig. 100. — Musoir d'Ostende. — Coupe.

Voici quelques dimensions de musoirs :

	Rayon	Longueur	Hauteur au-dessus des plus hautes mers	
			de la jetée	du musoir
Calais (jetée est)	6,00	18,00	1,80	2,50
Calais (jetée ouest) (largeur).	7,55	12,00	2,00	2,25
Boulogne (jetée nord) . . .	7,50	41,00	2,30	2,60
Boulogne (jetée sud) . . .	3,30	16,00	2,30	2,50
Dieppe, jetée ouest . .	3,50	11,00	3,20	3,20
Saint-Nazaire, jetée nord . .	5,10	10,00	1,50 à 4,40	4,40
Dunkerque (nouvelle jetée) . .	7,40		3,10	3,10
Ostende	9,00		3,00	3,00

La différence de hauteur entre la jetée et le musoir est rachetée par un plan incliné ; les marches sont exclues à cause du travail de nuit où elles seraient dangereuses. L'élargissement du musoir se fait du côté de l'estran pour ne pas encombrer le chenal.

Construction des jetées en charpente. — La construction des jetées s'opère *à la marée*, c'est-à-dire à marée basse ; quand l'eau atteint son niveau minimum, on active l'établissement de la jetée basse ; on commence par le battage des pieux de la palée enfouie ; pour l'exécuter, on échoue d'abord des radeaux de fascines chargés de moellons

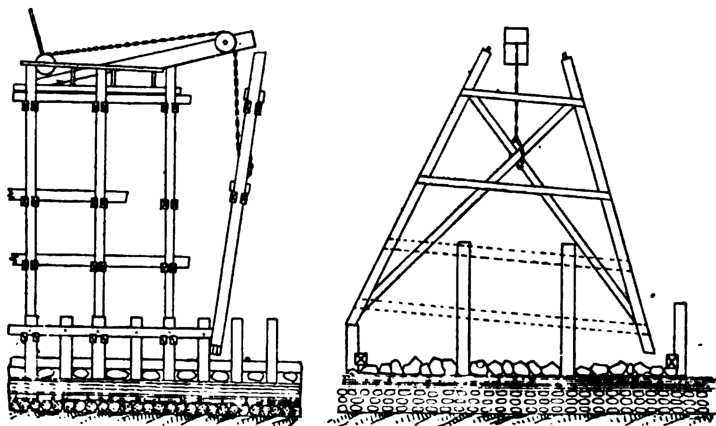


Fig. 101. — Pose des palées.

sur l'emplacement de l'ouvrage ; ce matelas a pour but d'empêcher les lames de déchausser les pieux battus, ce qui sans cette précaution

arrive inévitablement sur les plages de sable. On boulonne ensuite les moises inférieures sur lesquelles vient reposer la semelle inférieure des palées hautes, qui ont été construites d'avance à terre. Les fermes se manient aisément au moyen d'une chèvre, qui s'avance sur la portion déjà faite (fig. 101). Le travail se fait ainsi rapidement.

Jetées métalliques. — On a pendant quelque temps, en France, employé de préférence le fer au bois dans la confection ou la réfection des jetées. La figure 102 donne la coupe d'une des fermes de la jetée est de Dieppe ; elle est formée de fers à T réunis par des plaques d'assemblage. Les fermes sont espacées de 3 mètres ; de mètre en mètre un fer à T relie les entretoises horizontales. Cette jetée a subi de fortes avaries, parce que le fer ne se prête pas facilement aux formes nécessaires pour résister aux chocs auxquels sont exposés les ouvrages de l'entrée du port. Aussi dans les nouvelles constructions est-on revenu au bois.

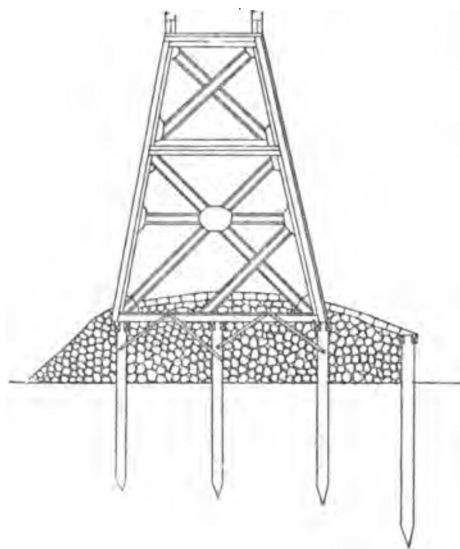


Fig. 102. — Jetée métallique.

Effet des jetées à claire-voie. — Les partisans des jetées à claire-voie leur reconnaissent les avantages suivants :

L'établissement en est aisé, rapide et moins dispendieux qu'avec les autres systèmes. L'accès des musoirs est facile, car la lame, ne rencontrant pas d'obstacle plein, n'est pas projetée et glisse sous le tablier ; il est donc possible d'aller porter une aide aux navires. Cependant les vagues sont suffisamment brisées pour n'arriver au chenal que diminuées, ce qui y assure un certain calme, tout en y laissant subsister une partie des courants de marée, suffisante pour que le régime de la mer change moins brusquement à l'entrée du port. Le ressac est moins violent qu'avec les môles pleins ; et l'agitation du chenal suffit à atté-

nuer le dépôt des matières en suspension, surtout des vases. Les galets et les sables sont en majeure partie arrêtés par la jetée basse. Enfin, en cas de choc des bâtiments, les avaries sont moins à craindre qu'avec les môles pleins.

Pour les ports de la côte flamande, on a dit aussi que les jetées parallèles à claire-voie, par l'agitation qu'elles maintiennent dans le chenal, étaient le meilleur procédé pour diminuer la quantité des envasements qui y sont considérables, 65 000 mètres cubes par an à Ostende.

Pour nombre d'ingénieurs, le système des jetées parallèles est le seul possible sur nos côtes de la Manche et de la mer du Nord. Mais d'autres reprochent au système de n'assurer la tranquillité du chenal qu'avec la mer relativement belle ; en cas de mauvais temps, il est impossible de s'y risquer. S'il est vrai que les frais de construction sont moins élevés, ceux d'entretien et de réparation sont coûteux et le remplacement des pièces est difficile. On n'a plus guère besoin d'aider aux manœuvres des navires qui se font presque tous remorquer, s'ils ne sont pas pourvus d'une machine. Enfin, malgré la jetée basse, les alluvions pénètrent dans le chenal et s'arrêtent contre la jetée au vent, où il faut les draguer, opération qui gêne le mouvement de la navigation.

Quant aux envasements, il semble que la quantité d'eau qui pénètre dans le port et dont la teneur en vase ne change pas suivant les conditions de la jetée est toujours la même pour une entrée donnée. Le dépôt se ferait surtout dans l'avant-port extérieur, si l'on employait des jetées convergentes, et leur enlèvement y serait plus facile que dans le chenal et l'avant-port intérieur où s'arrêtent les bâtiments en attendant l'entrée aux bassins.

Au chapitre consacré aux chasses, nous verrons combien ce mode d'entretien a fini par être insuffisant et comment il a fallu, pour plusieurs de ces ports septentrionaux, recourir aux dragages sur une grande échelle.

A Ostende, on ne demande plus aux chasses que l'expulsion de la vase, et l'on crée à cet effet un réservoir considérable. Dans ce cas, il y a certainement intérêt à laisser entrer les apports dans l'avant-port intérieur.

Jetées coffrées. — On a cherché à remédier à une partie des inconvénients signalés ci-dessus en fermant la jetée sur une partie de sa hauteur ; on a pu ainsi diminuer la hauteur de la lame et l'épanchement des alluvions dans le chenal. On a d'abord cloué des madriers

jointifs sur les montants tant en dedans qu'en dehors, puis on a rempli d'enrochements les caissons délimités sur la jetée basse. Ces enrochements sont arrimés pour résister le mieux possible par eux-mêmes ;

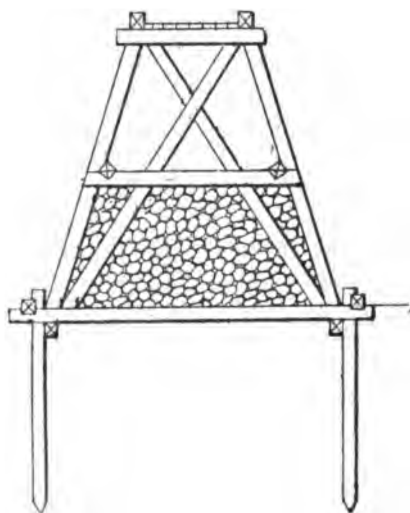


Fig. 103. — Jetée mi-coffrée de Dunkerque.

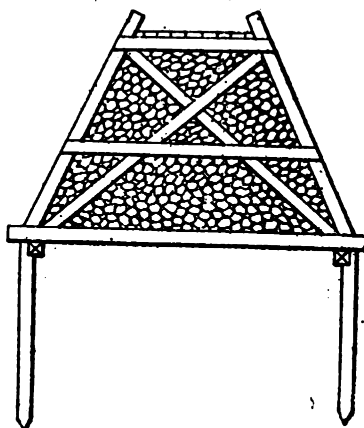


Fig. 104. — Jetée coffrée de Calais.

mais la lame ne laissant pas d'enlever les pierres à la partie supérieure du massif, on l'a appuyé par un couvercle horizontal en madriers fermant le coffre ainsi constitué, d'où le nom de jetées *coffrées*. Les figures 103 et 104 représentent d'anciennes jetées de Dunkerque et de Calais ; la première est mi-coffrée, la seconde est entièrement remplie d'enrochements. On conçoit que les madriers de soutien se détruisent et exigent leur remplacement ; bien que la conservation de l'ensemble soit encore plus longue qu'on ne pourrait le supposer, on n'en a pas moins généralement renoncé aux coffrages en charpente.

Le plus souvent d'ailleurs, on ne les établissait que sur une partie de la longueur de la jetée, il en résultait dans le chenal des différences dangereuses d'agitation.

Nous décrirons ailleurs les jetées de l'Adour et la nouvelle jetée Est de Dunkerque, ainsi que quelques types spéciaux.

Jetées en fascines (fig. 105). — Des jetées presque parallèles ont été construites à l'embouchure du canal artificiel qui relie à la mer le port de Rotterdam. Elles seront décrites au chapitre des constructions.

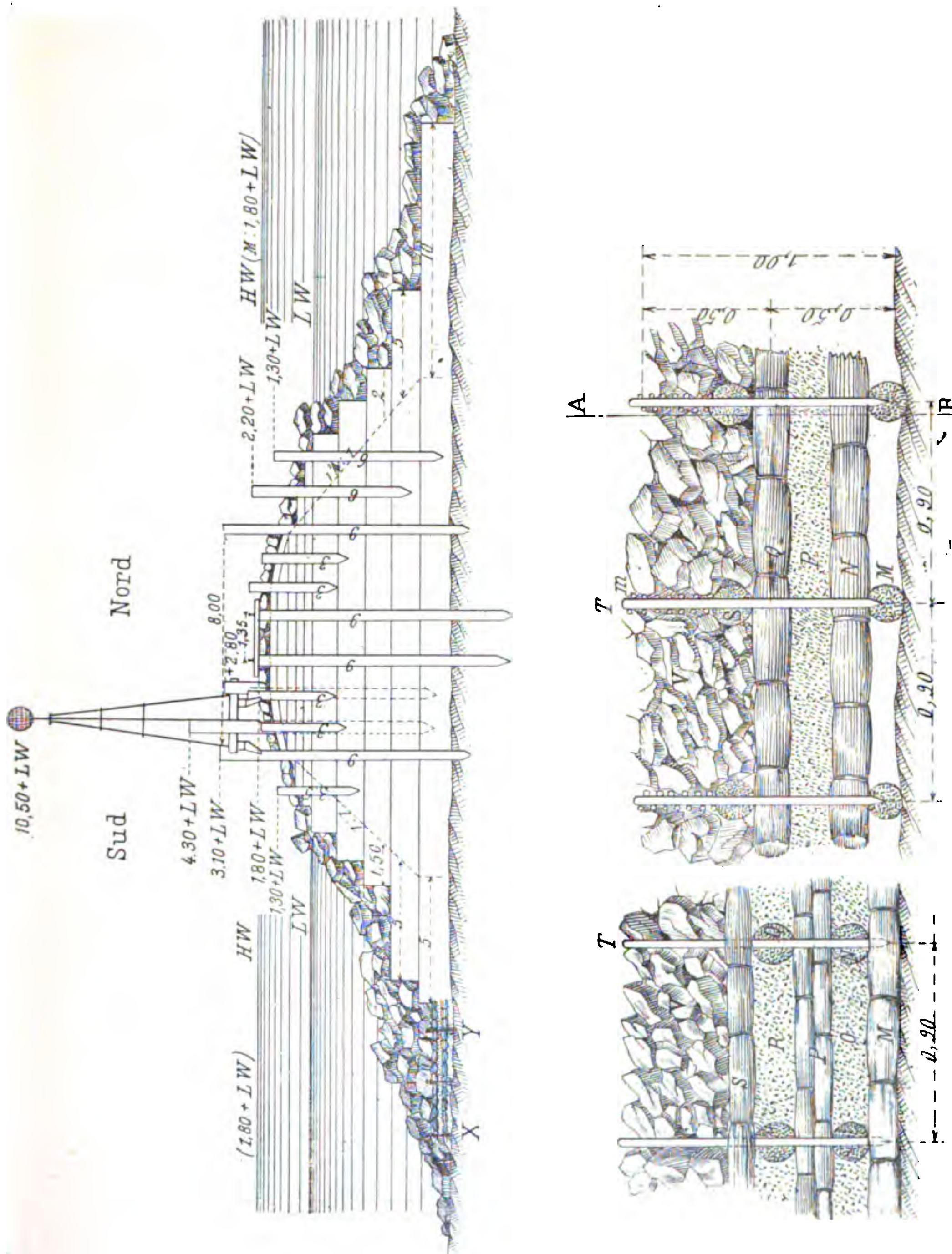


Fig. 105. — Jetée en fascines de Hoek von Holland.

BRISE-LAMES

On donne le nom de *brise-lames* à des plans inclinés ménagés derrière les jetées parallèles des ports de la Manche et de la mer du Nord. Les vagues qui franchissent les musoirs pénètrent latéralement dans ces chambres, perdent leur violence en remontant les plans inclinés et l'agitation dans le chenal est diminuée.

Les jetées sont interrompues à l'ouvert du brise-lames et remplacées par une estacade à claire-voie qui supporte le tillac. Les pieux de support de l'estacade sont plus espacés que ceux de la jetée, ce qui permet l'entrée facile des lames.

Le talus du brise-lames agit à la manière des plages, qui brisent d'autant mieux la violence des vagues que leur pente est plus douce. Mais l'angle ne peut être trop faible; autrement il faudrait donner au plan incliné des longueurs considérables, pour qu'il dépasse le niveau des plus hautes mers; l'expérience a indiqué que la pente la plus favorable est comprise entre 1/8 et 1/10. D'autre part, le seuil doit être à un niveau assez bas pour permettre l'entrée de la vague dans l'enceinte du brise-lames, au moins pendant les périodes de la marée où manœuvrent les navires. Dans nos ports, vu l'amplitude de la marée, ces conditions réunies font donner aux plans inclinés une longueur de 50 à 70 mètres.

Des expériences faites à Dieppe par M. Alexandre ont mis hors de doute l'influence des brise-lames sur la réduction de la hauteur des vagues et de l'agitation dans les chenaux à jetées parallèles; il y a même intérêt à en multiplier le nombre.

Si l'on en construit qu'un, il faut le placer le plus près possible du musoir, pour arrêter au plus tôt l'agitation. Il est évident qu'il doit se trouver dans la jetée que frappent les vagues qui ont pénétré dans le chenal, c'est-à-dire dans la jetée sous le vent. La distance au musoir doit d'ailleurs être suffisante pour éviter tout ressac produit par les murs du brise-lames.

Si l'on en installe plusieurs, les expériences indiquent qu'il y a avantage à les placer tous du même côté. Si cette disposition est impossible, on pratiquera les autres dans l'autre jetée, mais alors le coefficient de réduction des vagues sera moindre, tout au moins dans l'avant-port.

La longueur la plus avantageuse du plan incliné, dans le sens du chenal, est égale à la largeur même de ce chenal.

La construction des brise-lames n'offre rien de spécial.

La surface du plan incliné est pavée au mortier; les pavés sont posés sur un châlit de béton; autrement les vagues entraîneraient les matériaux.

Brise-lames du Havre. — Ils sont au nombre de trois, dont deux sur la rive nord et un sur la rive sud du chenal. Les deux premiers sont en charpente, l'autre en métal. Les estacades de charpente sont composées de fermes espacées de 3,60 *m* d'axe en axe. Une ferme comprend un poteau de rive incliné, un montant vertical et cinq contre-fiches réunies par quatre cours de moises. Les fermes sont reliées par quatre liernes et deux cours de moises, ainsi que par cinq longerons qui supportent le tillac; elles sont fixées sur deux pieux par un double scellement en fer. Entre deux fermes consécutives sont disposés trois poteaux intermédiaires de remplage. La largeur du tillac est de 5,20 *m* entre les garde-corps qui ont 25 *cm*; les pièces de charpente ont 30 × 30 *cm*.

L'estacade du brise-lames du sud, en fer, est courbe et mesure 100 mètres de longueur. Les cotes du seuil et du tillac sont + 2,15 *m* et + 10,65 *m*. La longueur est divisée en seize fermes, distantes de 6 mètres et composées de deux systèmes triangulaires dont les bases forment, l'une la semelle inférieure et l'autre le soutien du tillac. Un côté de l'un des triangles constitue le poteau de rive incliné à 20 %; l'ensemble est contreventé par des contre-fiches. Les fermes sont reliées par le garde-corps et des liernes; entre deux fermes il y a également trois poteaux de remplage.

La passerelle est formée de quatre cours de fers à double T supportant un plancher en bois de chêne; elle est bordée de deux corps de garde en tôle de 80 *cm* de hauteur, surmontés d'une main courante en bois. Elle a 3 mètres de largeur.

Tous les fers sont galvanisés.

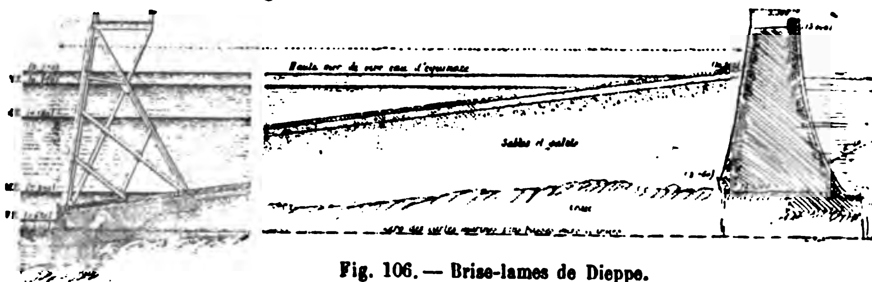


Fig. 106. — Brise-lames de Dieppe.

Dieppe. — Nous donnons figure 106 l'élévation du brise-lames de Dieppe qui ne diffère que par des détails de celui du Havre. Il a 149,50 *m* de longueur, dont 72,50 *m* en alignement et 77 mètres en courbe de 278 mètres de rayon. Il se compose de vingt-quatre fermes, séparées par trois poteaux de remplage.

C'est le même système qui a été appliqué à Saint-Valery en Caux.

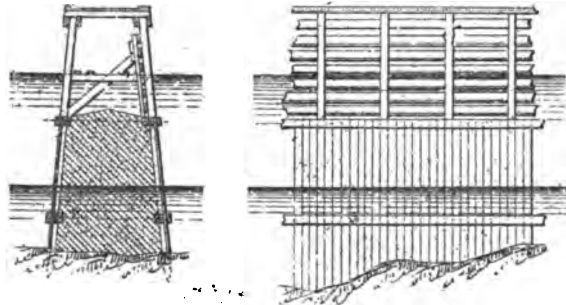
La figure 107 donne la coupe du brise-lames établi à Dunkerque dans la nouvelle jetée de l'est. Il a 160 mètres de longueur et 45 mètres de largeur : l'inclinaison est de 1/10. Il est limité extérieurement par un massif de sable recouvert de pavés maçonnés.

Fig. 107. — Brise-lames de Dunkerque.

On emploie encore d'autres procédés pour empêcher la vague de pénétrer dans les darses et avant-ports.

Au port de commerce de Brest, l'entrée principale se trouve entre le môle de l'ouest et la digue du sud. L'extrémité ouest de celle-ci se recourbe en masquant la passe. Le môle occidental présente près du musoir un rentrant de 50 mètres de longueur sur 40 mètres de profondeur, qui arrête la houle.

On emploie des épis quand l'avant-port est assez large pour que la manœuvre des navires n'en soit pas gênée. Tel est l'épi courbe que nous avons établi dans l'avant-port de Saint-Pierre (Réunion) et derrière lequel la tranquillité est complète. A Trieste, l'épi est à l'intérieur de la digue, près de l'extrémité du nord ; mais il est, paraît-il, gênant pour la navigation et sera supprimé. Aux Sables-d'Olonne, il est également intérieur, au bout de l'une des jetées.



Coupe et élévation.

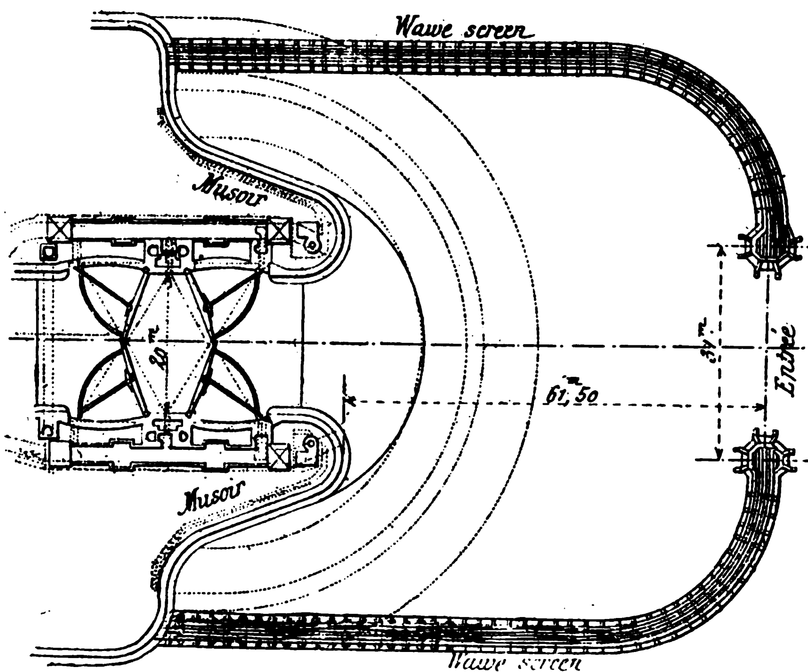


Fig. 108. — Wave screen de Sunderland. — Plan.

A Blyth, où les jetées sont parallèles, un épi oblique situé à l'extrémité de la jetée est arrête parfaitement les vagues avant qu'elles n'at-

teignent les points d'embarquement du charbon; les ingénieurs, MM. Moncrieff et Sandeman, vont en construire un second un peu en avant du premier (1).

A Sunderland, de chaque côté de l'avant-port, on a ménagé des retraites où la lame peut s'épanouir (*Wave Basin* et *Potato Garth)*. Au même port, pour protéger l'entrée de l'écluse de mer qui s'avance dans l'avant-port du sud, on l'a entourée de deux jetées parallèles, formant une sorte de brise-lames (*wave screen)*, figure 108. La partie basse est en béton; au-dessus règne une charpente en claire-voie. Les musoirs extérieurs de l'écluse se prolongent en épis; dans l'espace compris entre eux et les jetées, la vague s'engouffre et se déverse à travers la claire-voie.

A Mullaghmore on a pratiqué dans le mur du fond de l'avant-port une coupure par-dessus laquelle passe la vague, qui n'est plus réfléchie. M. Sandeman a proposé pour les ports de pêche de ménager aux points de rencontre des murs de l'avant-port et du port des vides par où les vagues s'épancheraient au dehors.

A Hartlepool, on avait disposé des ouvertures qui conduisaient les lames dans des canaux intérieurs, par lesquels elles revenaient à la mer. Mais on n'a obtenu aucun résultat. (2)

(1) Nous devons ces détails à leur obligeance.
(2) Renseignement dû à l'obligeance de M. l'Ingénieur Nagel.

CHAPITRE XVI

CHASSES

Les ports creusés dans d'anciennes criques, sur les rivages où la marée est notable, comme Calais, Dunkerque, avaient jadis, on l'a vu, leur chenal naturellement libre. L'eau accumulée dans ces bassins pendant le flot *chassait* en se retirant les apports accumulés devant l'entrée.

Le jusant a, en effet, plus d'action à ce point de vue que le flot dans le chenal. Quand une vaste étendue liquide communique avec la mer par un étroit canal, l'échange d'eau entre elles nécessite une pente ; pendant le flot la mer et le chenal sont plus hauts que le bassin ; celui-ci, au contraire reste plus élevé durant l'ebbe. Les eaux de sortie traversent donc le chenal à un niveau inférieur à celui des eaux d'entrée, et l'action sur le fond est par conséquent plus grande.

Mais la main de l'homme a contrarié doublement la nature : d'une part en élargissant et approfondissant le chenal ; d'autre part en réduisant la superficie des terrains submersibles par l'empiètement des terrains livrés à l'exploitation. Aussi l'entretien de ces ports est-il devenu difficile.

Chasses artificielles. — L'entretien a été longtemps opéré par l'emploi des chasses artificielles. Elles consistent en un violent courant déterminé dans le chenal et même dans l'avant-port par l'ouverture subite, à la basse mer, de portes qui retiennent l'eau emmagasinée à marée haute dans un bassin spécial, dit *bassin de chasse*.

Ce bassin est souvent un reste de l'ancienne crique ; d'autres fois il est creusé artificiellement. A Calais on employait en surplus l'eau des fossés des fortifications.

Les chasses artificielles n'ont guère été usitées qu'en France et en Belgique et sont presque entièrement abandonnées. Nous n'en

parlerons donc qu'à propos de Dunkerque et de Boulogne, où elles ont été appliquées sur une grande échelle, et de Calais, d'Honfleur et d'Ostende où il y a eu de récentes installations.

On appelle *écluse de chasse* l'ouverture, ou pertuis, munie de portes, par où s'échappe l'eau. Elle doit être placée de façon à en laisser s'écouler rapidement une grande quantité et à la diriger pour obtenir le maximum d'effet. La durée d'une chasse ne doit pas dépasser trois quarts d'heure.

Dunkerque. — Primitivement, à Dunkerque, on lâchait les chasses à toute marée, imitant ainsi la nature, mais en perfectionnant son mode d'action ; on n'avait chaque fois à nettoyer que les apports du flot précédent, d'une faible épaisseur et à peine consistants. Plus tard, on abandonna cette pratique et les chasses eurent lieu tous les quinze jours, aux marées de vive eau, où l'on dispose d'une tranche de liquide plus considérable et où le chenal est le moins profond. Mais on avait à enlever des couches beaucoup plus importantes, puisqu'elles avaient été apportées par trente marées ; elles avaient eu aussi le temps de se tasser et de durcir. Le courant divaguait aisément et l'effet produit était très réduit.

Les chasses étaient lancées par trois écluses correspondant à trois bassins de retenue ; elles étaient échelonnées sur toute la longueur du port d'échouage, de l'avant-port et du chenal. On avait :

1° En commençant par l'aval, à l'origine du chenal, l'écluse de chasse proprement dite à cinq pertuis, dont le central avait 5,20 *m* de largeur et les autres 4 mètres, placés symétriquement à côté du premier ; la hauteur de chute disponible était de 4,50 *m* à 5 mètres, mais on n'en utilisait que 2,50 *m*. Le seuil des pertuis était à la cote + 60 *cm*.

Le bassin de retenue correspondant présentait 30 hectares de superficie, et donnait 750 000 mètres cubes.

2° L'écluse de la Cunette, à pertuis unique de 10 mètres, avec seuil à la cote 0 et tranche d'eau utile de 2 mètres. La superficie de la retenue correspondante étant de 10 hectares, on disposait de 200 000 mètres cubes.

3° Les douze vannes placées dans les portes des écluses du bassin à flot du Commerce, dont le débouché total est de 12 mètres carrés fonctionnant sous une charge moyenne de 3,50 *m* et la vanne de l'aqueduc de chasse, sous le terre-plein de l'écluse de barrage, avec un débou-

ché de 1,20 *m* sous la charge de 3 mètres. Elles utilisaient l'eau des bassins à flot, dont la superficie était de 11 hectares, et d'où l'on pouvait retirer 100000 mètres cubes.

Le total était donc d'un million de mètres cubes environ.

On lâchait d'abord l'eau de l'étage d'amont, et à mesure qu'elle arrivait devant les autres pertuis on en ouvrait les portes.

Avec ces chasses, on était arrivé à obtenir dans le chenal une profondeur de — 2 mètres pendant les jours qui suivaient l'opération ; cette profondeur se maintenait jusqu'à 200 mètres en dehors des jetées ; mais au delà, on rencontrait des fonds de + 50 *cm* ; l'amélioration obtenue dans le chenal n'était donc pas utilisable.

Guideaux. — De plus l'eau des chasses, en quittant le chenal, était toujours déviée de 20 à 30° vers le nord, de sorte que l'estran de l'ouest tendait à envahir l'ouverture des jetées. Les navires venant de ce côté éprouvaient de grandes difficultés à l'entrée à cause de la disposition des bancs de la rade.

Si l'on avait pu prolonger la jetée de l'est de 300 mètres environ, l'action des chasses, protégées contre le courant traversier, au lieu de se reporter vers la droite à la sortie du port aurait attaqué ces sables menaçants; mais ce travail eût été nuisible à l'entrée, par suite des effets du régime général des alluvions dues aux courants de haute mer.

On songea en 1862 à une jetée basse mobile, échouée à basse mer en prolongement de la jetée de l'est, et qu'on enlèverait à mi-marée montante; on la réalisa au moyen des guideaux, engins d'un emploi assez fréquent à l'intérieur des ports d'échouage, mais qui n'avaient jamais été portés en pleine mer.

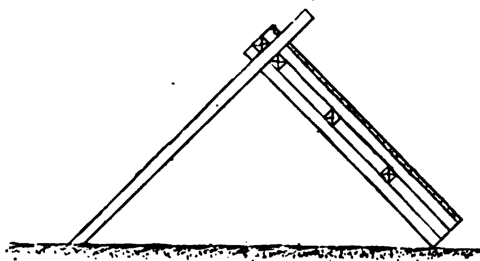


Fig. 109. — Guideau.

Ce sont de grands panneaux en bois disposés obliquement de façon à constituer une rive artificielle ; on les appuie par des béquilles. A Dunkerque il y en avait 30 de 10 mètres de longueur, formés chacun

de 5 longrines de 30 *cm* d'équarrissage, réunies par dix cours de moises en travers, dont cinq sont armées de sabots en fer à leurs extrémités inférieures. Les moises supérieures reçoivent un plancher en demi-madriers jointifs de 4 *cm* d'épaisseur; tout est en sapin (fig. 109).

Les béquilles sont des pièces de 7 à 8 mètres de longueur et de 30 *cm* d'équarrissage passant par des ouvertures carrées de 40 *cm* de côté; elles sont manœuvrées par des chèvres et maintenues dans les positions voulues par des chevilles.

Deux heures avant la basse mer, on opérait le déhalage des guideaux en dehors des jetées; on les plaçait en prolongement de celle de l'est, au moyen d'ancres et d'aussières. Les béquilles étaient abaissées en forçant sur leurs têtes à l'aide de treuils; cinquante hommes étaient employés à ces manœuvres.

Les guideaux ont servi de 1862 à 1878. En 1864, 1871 et 1872 il n'y a pas eu de sorties, parce qu'on n'a pas trouvé de temps assez calme; et dans les quatorze autres années, ils n'ont servi que 59 fois, soit en moyenne 4 fois par an; mais ces emplois n'ont pu que huit fois être effectués avec les 30 guideaux, soit 300 mètres de longueur. En moyenne, la longueur a été de 210 mètres. On conçoit que dans ces conditions, l'effet obtenu ait été de peu d'importance. La dépense avait été de 435 000 francs pour la construction et l'emploi de ce matériel encombrant. Devant de pareils résultats, on a renoncé depuis 1870 à cette expérience.

En 1881 avait été projetée et commencée la création de deux nouvelles écluses, alimentées par un bassin spécial et les fossés des fortifications et qui devaient doubler le volume d'eau disponible; mais il fut reconnu vite que pendant l'hiver on ne pourrait pas disposer de plus des deux tiers de cette quantité et qu'en tout cas il fallait renoncer à l'espoir de maintenir une profondeur de 4 mètres dans le chenal et les abords; le projet fut abandonné et depuis les chasses ont été totalement supprimées. A ce moment, l'ensemble des dépenses annuelles nécessitées par le système d'entretien par ce procédé représentait un total de 405 000 francs ainsi répartis :

Intérêt du capital de premier établissement. . . .	339000 francs
Entretien normal.	50100 »
Dépenses de fonctionnement	15950 »
	405050 francs

Boulogne. — Le fonctionnement des écluses comporte certaines précautions pour éviter les affouillements déterminés par les courants de chasse et de remplissage : des radiers sont placés en avant et en arrière des pertuis. La description des anciens ouvrages de Boulogne les fera connaître:

La retenue se compose de deux bassins : 1° l'arrière-port qui s'étend du barrage éclusé au pont; 2° le bassin de retenue pour lequel on avait utilisé le lit de la Liane. Ensemble ils mesurent 65 hectares; la hauteur de la retenue est de 6,25 *m* et le volume disponible atteint 1 640 000 mètres cubes.

Le barrage éclusé se compose de deux pertuis de chasses latéraux, de 6 mètres de largeur chacun et d'un pertuis central de 12 mètres de largeur muni de portes dites portes d'ebbe, et réservé pour la navigation. Ces pertuis sont séparés par des piles de 10 mètres d'épaisseur. La distance entre les parements extérieurs des culées est ainsi de 44 mètres; la largeur du corps de barrage est de 32 mètres.

L'ensemble des piles et culées est établi sur un radier général de 34,70 *m* de largeur, compris entre deux lignes de pieux jointifs de 4 mètres de fiche; ce radier en béton est épais de 2 mètres, compris le dallage en pierres de taille qui le revêt dans les pertuis.

Le barrage est garanti contre les affouillements : à l'amont, par un avant-radier de 16 mètres de largeur sur 70 mètres de longueur; à l'aval, par un radier carré ayant 70 mètres de côté.

L'arrière-radier d'aval est fondé sur 12 lignes de pieux parallèles; les pieux sont distants de 2 mètres d'axe en axe et ont 3 mètres de longueur; ils sont réunis par des chapeaux sur lesquels sont fixés des madriers d'orme de 7 *cm* d'épaisseur; le tout est recouvert d'une couche de béton. L'avant-radier est construit également sur 8 lignes de pieux.

Ce dernier ouvrage est lui-même protégé par des enrochements.

Fermeture des pertuis. — Les pertuis de chasse sont fermés par un vantail unique, tournant autour d'un axe plus ou moins central, ainsi qu'un tourniquet; cette disposition a pour but de permettre une ouverture rapide, de manière à lancer d'un seul coup tout le courant dans le chenal. Mais si ce vantail était trop large, il éprouverait de violents chocs pendant cette ouverture instantanée; il doit donc ne dépasser guère 6 mètres de largeur; comme il faut, d'autre part, assurer l'écoulement d'une grande quantité d'eau, on établit plusieurs

pertuis ; leur juxtaposition et leur symétrie s'expliquent par la même cause.

En général, l'axe de rotation du vantail le sépare en deux parties inégales de 1/10 environ AB, BC (fig. 110), B étant le tourillon. Pour maintenir la porte fermée, l'extrémité la plus longue bute contre un poteau demi-cylindrique D appelé poteau valet et qui peut tourner dans l'encoche E pratiquée dans la muraille. Sorti de l'encoche, le poteau valet maintient le vantail fermé ; rentré, il lui permet d'obéir à la pression de l'eau qui agit plus fortement sur la partie la plus longue et la force à s'incliner en aval. Le vantail prend alors une position parallèle au courant.

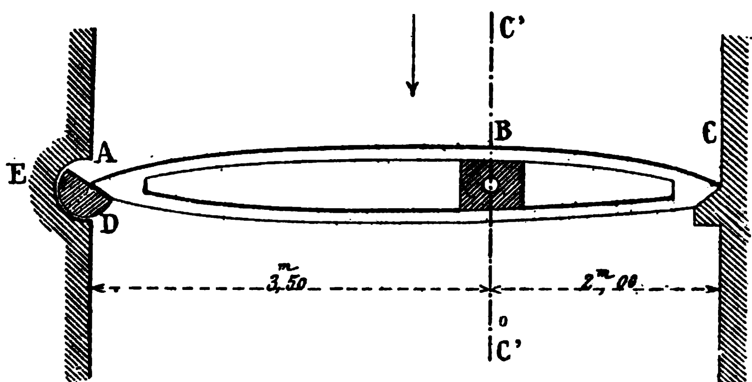


Fig. 110. — Fermeture des pertuis.

Le vantail, pendant la fermeture, est maintenu par un levier coudé formant arrêt du poteau valet ; en déclanchant ce levier, on rend la liberté au poteau qui tourne de lui-même sous la pression du vantail. L'ouverture se fait donc avec toute la rapidité voulue.

Quand la tranche d'eau nécessaire est écoulée, le courant est encore très fort, et pourtant il faut pouvoir fermer la porte. Dans sa partie la plus longue sont ménagées des ouvertures munies de vannes ; ces ouvertures sont telles que lorsqu'elles sont démasquées, la surface pleine qui reste à cette partie du vantail devient inférieure à la surface de la partie la plus courte. En ramenant légèrement la première, on détermine sur la seconde une pression excédente, qui ferme d'elle-même la porte ; le levier coudé fait tourner les poteaux valets et l'arrêt est enclanché.

A Boulogne, par exception, le vantail unique, de 5,92 *m* de largeur, a été divisé en deux parties égales par l'axe central ; sa hauteur est de

6,55 *m*; il est placé à 18 *cm* du radier, pour éviter les frottements.

Deux vannes, placées dans l'une des portions et manœuvrées par des crics, démasquaient des ouvertures de 95 *cm* de largeur sur 3 mètres de hauteur chacune, soit ensemble près de 6 mètres carrés ou le tiers de la surface de cette portion.

Les portes sont placées dans le pertuis à l'amont, où la vitesse est moins grande qu'à l'aval, puisqu'il s'agit d'une nappe noyée en dessous et dont la hauteur et par conséquent la section diminuent avec l'éloignement du réservoir. La direction des écluses fait avec le chenal l'angle le plus petit possible, afin que le courant ne soit pas dévié.

Radiers. — Les radiers, établis sur des terrains peu résistants, sont construits sur pilotis et ont des dimensions très fortes, pour résister à la violence des affouillements. Voici comment était construite l'ancienne écluse de chasse de Calais:

Elle avait 85,73 *m* de longueur, avant-radier compris; les buscs étaient arasés à la cote + 30 *cm*; la fondation était formée par un radier général en béton de pouzzolane artificielle recouvert par un dallage de 2,10 *m* d'épaisseur, avec parafouilles de 3 mètres d'épaisseur à la tête amont et sous les buscs, et de 4,50 *m* à la tête aval. L'avant-radier d'amont était également en maçonnerie de béton avec dallage de 1,55 *m*, protégé par des fascinages recouverts de pavages; l'avant-radier d'aval, en maçonnerie de béton de 4,20 *m* d'épaisseur maxima, recouverte par un plancher porté par des pieux, était protégé par un grand développement d'enrochements. La fiche des pieux était, à la tête de l'avant-radier amont de 5,50 *m*, à l'aval de 9 mètres et à la tête de l'avant-radier aval de 7,80 *m*.

On recharge fréquemment les avant-radiers en maçonnerie sèche, à l'aval avec de gros libages, à l'amont avec des coffres en fascinages remplis de blocailles, afin d'éloigner les affouillements des têtes de l'écluse.

Nouvelle installation à Calais. — Au nouveau port de Calais, des chasses ont été installées, malgré l'opinion de nombreux ingénieurs qui les regardaient comme inutiles. Le bassin, construit le long du littoral, a une superficie de 90 hectares; le fond est à la cote + 5 mètres; une rigole centrale conduit l'eau aux pertuis. On dispose de 1 600 000 mètres cubes à débiter en trois quarts d'heure sous une chute variant de 4,25 *m* à 6 mètres.

L'orifice d'évacuation est à 255 mètres de l'extrémité des jetées. L'écluse comprend cinq pertuis de 6 mètres de largeur chacun, séparé par des piles de 3,50 *m* d'épaisseur ; le seuil est à la cote + 1 mètre. La fondation est formée d'une plateforme en béton de mortier hydraulique établie dans une enceinte de pieux et palplanches et reposant sur des pilotis en orme, battus en quinconce, dont la tête est noyée dans la masse du béton. Le dessous de la fondation, établi en général à—2,50 *m*, est descendu à — 3,50 *m* aux extrémités de l'ouvrage.

La plateforme en béton, épaisse de 1,90 *m*, est recouverte d'un radier en maçonnerie de blocailles et mortier de Portland, revêtu lui-même d'un dallage en pierres de taille et moellons smillés.

Le radier de l'écluse est défendu à l'amont et à l'aval par deux profonds parafouilles en béton de 5,50 *m* d'épaisseur, compris entre deux files continues de pieux et palplanches de 7,50 *m* à 8 mètres de hauteur, descendues jusqu'à — 8 mètres. Le radier est prolongé par des avant-radiers.

Ostende. — On exécute en ce moment à Ostende la construction d'un nouvel avant-port qui sera débarrassé des vases par la chasse d'un réservoir de 70 hectares dont l'écluse comprendra six pertuis de 5 mètres d'ouverture chacun, et dont le radier se trouvera à la cote — 4 mètres, tandis qu'il est placé en général un peu au-dessus du zéro, pour la facilité des visites et réparations. Mais de Mey, l'éminent ingénieur du port, a établi par le calcul les proportions suivantes relatives de l'effet utile d'un courant de chasse :

Profondeur du radier —	Effet utile —	Vitesses moyennes dans le chenal —
0 *m*	1	0,41 *m*
—2	3,21	0,80
—4	6,51	1,17

L'expérience sera donc très intéressante.

Selon l'opinion de l'ingénieur déjà cité, les chasses à Ostende ne sont pas pour lutter contre l'invasion des sables, mais contre l'envasement produit par les eaux chargées qui proviennent de l'Escaut.

Honfleur. — Il a été construit en 1881 à Honfleur un bassin de chasses avec tous les perfectionnements les plus récents. Conquis sur la mer, il mesure 54 hectares et est creusé dans toute son étendue à

1 mètre au-dessous du niveau moyen du sol naturel. Avec cette profondeur il reste toujours plein d'eau, ce qui empêche les émanations malsaines. On dispose ainsi d'un cube de 330 000 à 700 000 mètres cubes suivant les marées (fig. 111).

La digue d'enceinte, arasée à 2 mètres au-dessus des plus hautes mers, a 12 mètres en couronne ; elle est formée d'un noyau en terre grasse protégé de chaque côté par des perrés. Le revêtement extérieur a un talus de 3 de base pour 1 de hauteur et une épaisseur de 1,60 *m* ; le pied est défendu par une risberme en enrochements ; le revêtement intérieur a une inclinaison de 3 pour 2 et une épaisseur d'un mètre.

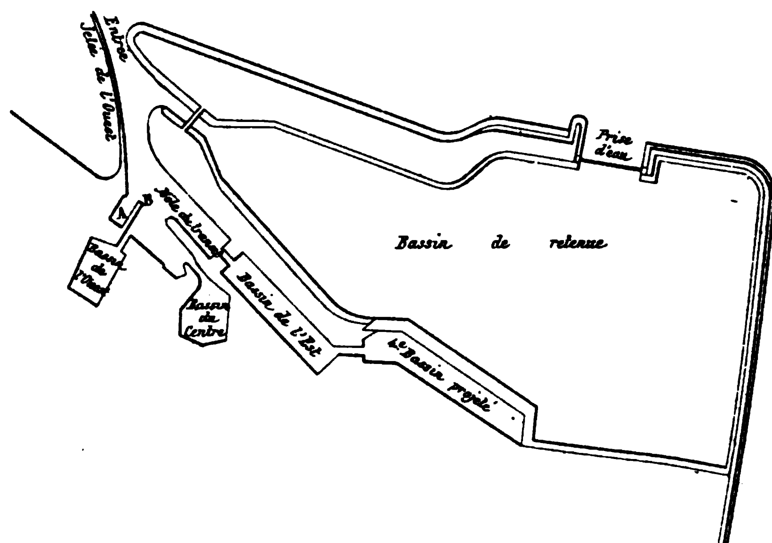


Fig. 111. — Port d'Honfleur.

L'écluse de chasse comprend quatre pertuis de 5 mètres chacun séparés par des piles de 2 mètres ; l'ouvrage est fondé sur un radier général en béton de 2 mètres d'épaisseur reposant sur des pilotis à tête noyée dans la couche. Le revêtement, en pierres de taille de granite, a 50 *cm* d'épaisseur. Pour éviter l'affouillement qu'on redoutait à l'aval, on appuya ce radier par une maçonnerie construite dans un caisson à l'air comprimé et mesurant 42 mètres de longueur, 2 mètres de largeur et 16,30 *m* de hauteur.

Chaque pertuis est fermé par deux vannes de garde qui assurent l'étanchéité de la fermeture et défendent contre les lames la porte tournante. Celle-ci est divisée par le tourillon en deux parties sensiblement égales, car l'une n'a que 9 centimètres de plus que l'autre.

Dans le grand panneau est ménagée une ventelle tournante, dont l'axe vertical est très excentré, et qui s'ouvre instantanément sous la pression de l'eau, dès qu'on dégage l'arrêt qui la soutient.

Construction des portes. — Elles se composent d'aiguilles verticales en chêne, de 40 *cm* d'épaisseur, reliées à leurs extrémités par des portes en fer à double T formant moises et semelles noyées dans le bois. Les aiguilles sont réunies par trois boulons horizontaux qui traversent toute la porte ; le système est rendu solidaire par deux ceintures en fer forgé. L'axe est formé par une poutre à double T terminée par deux pivots et assemblée avec les moises horizontales ; les pivots sont en acier de 21 *cm* de diamètre.

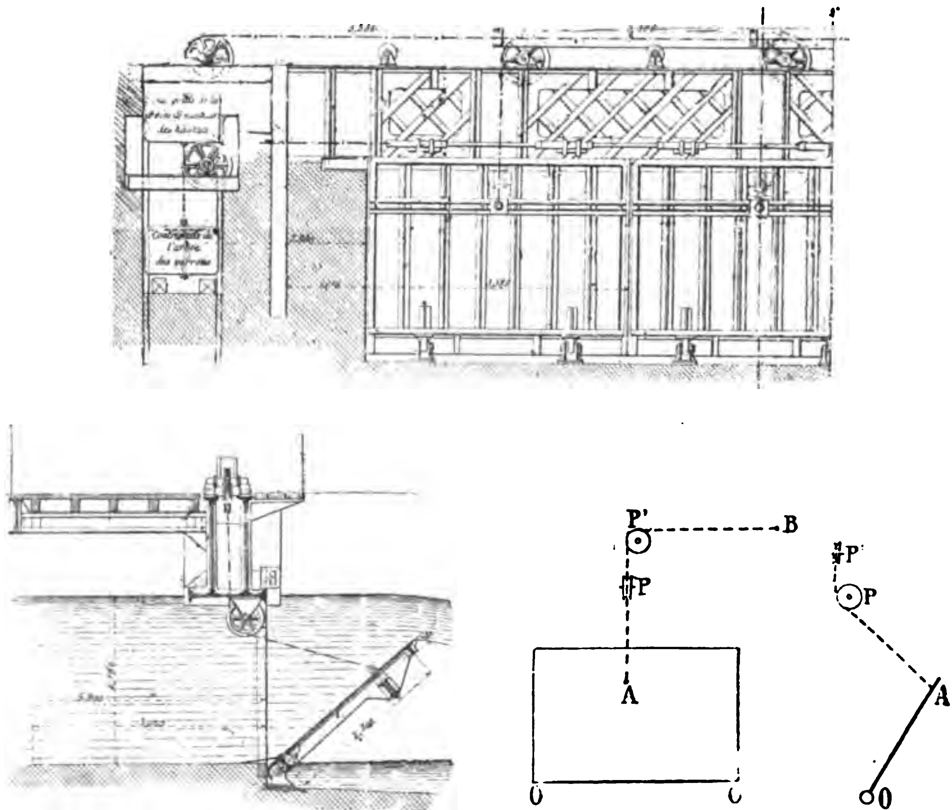


Fig. 112. — Déversoir d'alimentation.

Déversoir d'alimentation (fig. 112). — A Honfleur, l'eau est chargée de vase qui se dépose dans les bassins ; aussi ne laisse-t-on entrer dans celui des chasses que l'eau de la surface, moins vaseuse ; pour y arriver,

il a été ménagé à la partie supérieure du mur d'enceinte une coupure par dessus laquelle l'eau peut passer pendant la haute mer. Cette coupure a en totalité 100 mètres de longueur, divisés en dix parties de 10 mètres, séparés par des piles. La pile centrale a 19,80 *m* de largeur et elle porte le bâtiment des machines; les pertuis sont disposés symétriquement de chaque côté; les piles qui les séparent ont une épaisseur de 2 mètres. Chaque pertuis est fermé par trois hausses mobiles, tournant autour d'une charnière horizontale fixée dans le radier et maintenues par une chaîne fixée à leur partie supérieure. Ces chaînes passent toutes sur des poulies de renvoi et vont s'attacher à un châssis roulant sur des galets, dont la translation détermine un mouvement de rotation simultané de toutes les hausses. Le châssis est mû par deux presses hydrauliques, avec contrepoids.

La manœuvre consiste à abaisser graduellement les hausses, au moment de la pleine mer, de façon qu'il ne passe par-dessus leur crête qu'une tranche d'eau de 60 *cm* de hauteur. Quand la retenue est pleine, on relève les hausses.

La Perrotine. — Le type le plus récent de pertuis de chasse est celui installé au chenal de la Perrotine, dans l'île d'Oléron (fig. 113). Il a 6 mètres de largeur et la hauteur d'eau peut y atteindre 6,80 *m*. La vanne, sauf quelques accessoires, est toute en acier. L'ossature se compose des deux traverses, supérieure et inférieure, reliées par trois poutres verticales : les poteaux battants et le poteau-tourillon médian, excentré de 6 centimètres. Le bordage est soutenu par des membrures horizontales. Dans l'ossature du plus grand vantail sont logées les glissières d'une ventelle à jalousie.

Le poteau-tourillon repose inférieurement sur un pivot à crapaudine scellé dans le radier, et supérieurement dans les coussinets d'un palier horizontal fixé sur une traverse encastrée dans les bajoyers et qui sert de passerelle.

Les poteaux battants, munis de fourrures en bois, s'appuient sur les valets qui eux-mêmes portent deux fourrures en bois, l'une pour recevoir le poteau battant, l'autre qui s'appuie sur le maçonnerie et forme joint étanche. Les valets tournent dans des puits scellés dans le radier et sont manœuvrés par des cabestans.

Le poids total est de 29 tonnes.

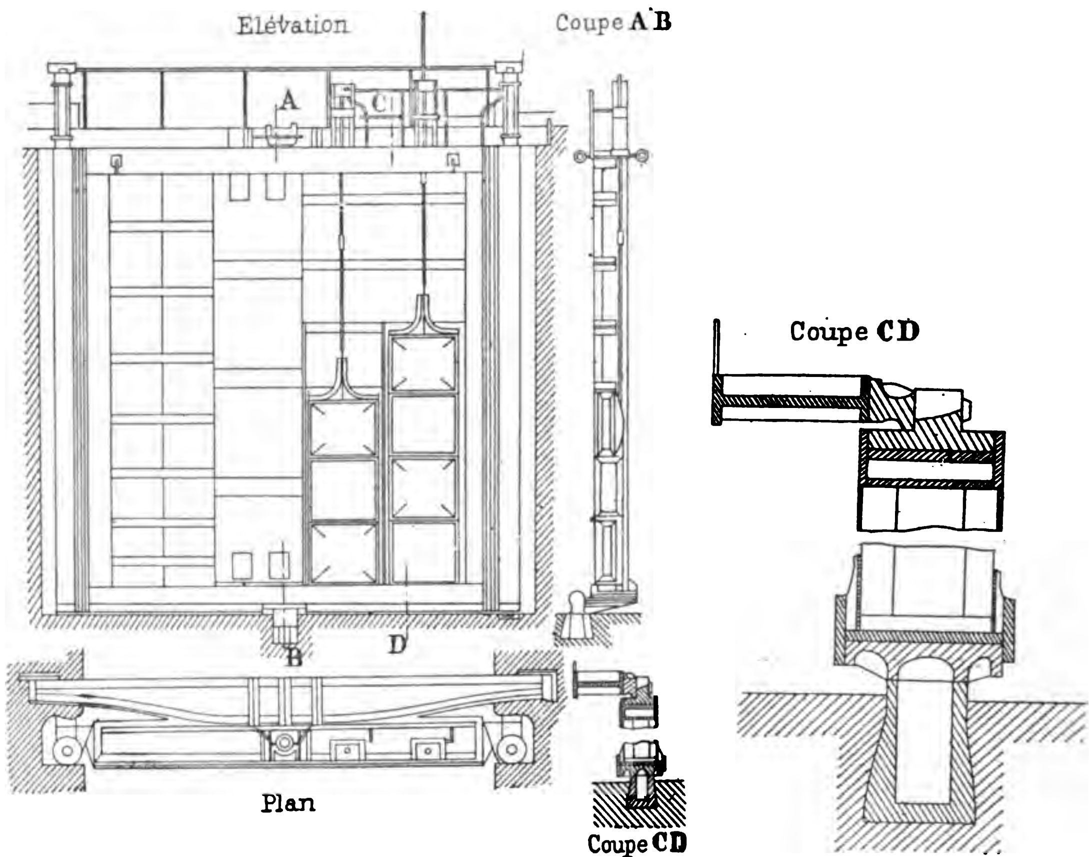


Fig. 113. — Vanne de la Perrotine.

On a parfois obtenu le creusement de chenaux par des moyens très simples qu'il est intéressant de connaître.

M. Partiot a étudié l'action des obstacles isolés posés sur un fond de sable. Des pierres, dans ces conditions, donnent naissance à un remous qui creuse un sillon derrière elles, du côté de terre. Il a trouvé que c'étaient les pyramides à base triangulaire ou quadrangulaire qui exerçaient l'action maxima. On a installé ainsi à Bernières, près de Courseulles, des pyramides devant l'exutoire de tuyaux de drainage ; elles entretiennent une flache dont la profondeur atteint 50 *cm* et qui suffit pour maintenir libre la sortie de l'eau ; elles ont 1,70 *m* de côté et sont quadrangulaires [1].

(1) Ces ouvrages sont aujourd'hui abandonnés

Au port d'Honfleur, pour creuser la passe ensablée, on a eu jadis recours à un procédé qui a donné des résultats satisfaisants. On ancrait sur l'axe du chenal, au moyen de grosses pierres de 75 kilogrammes, des paniers cylindriques en osier de 60 *cm* de hauteur et 50 *cm* de diamètre ; au flot, le panier se soulevait et se balançait à l'extrémité de la corde d'attache. Avec 80 paniers espacés de 2,50 *m* il se produisit après deux jours un canal de 200 mètres de longueur, 6 mètres de largeur et 1,30 *m* de profondeur, qu'on agrandit par les chasses.

CHAPITRE XVII

DRAGAGES

Tous les ports ont besoin d'un entretien permanent, tout au moins pour enlever la vase qui s'y dépose. Quelques-uns ont à lutter contre l'envahissement du sable et du galet. Le dragage sert encore à approfondir les chenaux, les bassins, les rades elles-mêmes, à préparer les fondations de certains ouvrages.

Creusement à sec. — Quand on peut assécher l'espace à creuser, il y a presque toujours avantage à le faire, car la drague est souvent un instrument coûteux. Les travaux d'excavation s'exécutent alors par les procédés ordinaires. La plupart des bassins à flot et des canaux ont été ainsi creusés, soit à bras, soit au moyen des excavateurs ou des terrassiers américains, dont le rendement dépasse 100 mètres cubes par heure.

CREUSEMENT SOUS L'EAU

Au delà d'une certaine profondeur, 2 mètres par exemple, on se sert de dragues. Pour de petits travaux spéciaux, elles sont mues à la main; mais pour les entreprises d'une certaine importance, elles sont à vapeur et prennent de nos jours des dimensions de plus en plus grandes.

Les modèles principaux sont au nombre de quatre : *Dragues à échelles. — Dragues à godet unique. — Dragues à mâchoires. — Dragues par aspiration.*

Drague à échelles. — C'est la plus employée en France. Elle comprend :

Un *bateau* ou *coque*, qui porte les instruments de dragage et la force motrice ;

Une chaîne dragueuse, composée de longs maillons articulés et qui

roule sans fin sur deux tourteaux placés aux extrémités d'une *élinde*. A la chaine sont également articulés les *godets*.

L'élinde est une forte poutre métallique inclinée, dont l'extrémité supérieure oscille autour d'un arbre horizontal porté par un beffroi. L'autre extrémité s'élève ou s'abaisse dans un puisard rectangulaire pratiqué à l'avant du bateau ; ce mouvement est donné par des chaines enroulées sur un treuil à vapeur. L'élinde s'incline assez pour que les godets puissent draguer à la profondeur voulue.

La machine à vapeur fait tourner le tourteau supérieur, prisme à quatre pans sur lesquels s'adaptent les maillons de la chaine dragueuse ; le mouvement de progression qu'elle reçoit ainsi se communique au tourteau inférieur, auquel l'expérience a conduit à donner cinq ou six pans égaux à ceux de l'autre. Les godets entrainés mordent le sol et ramènent les déblais, qui sont versés au haut de l'élinde sur une plaque inclinée dite *papillon*, d'où ils glissent dans les couloirs de chute.

Construction. — Les formules de la résistance des matériaux ne peuvent être appliqués aux dragues, qui par suite de la rencontre d'obstacles imprévus ont à subir de violentes secousses même dans les terrains les plus faciles. Il faut donc s'adresser à des constructeurs expérimentés.

Les coques métalliques sont préférables ; on donne un excès d'épaisseur aux tôles au-dessous de la flottaison, ainsi qu'à celles de l'avant et aux parois du puisard contre lesquelles butent parfois des troncs d'arbre, des ancres. Il peut par suite s'y manifester des déchirures qui indiquent la nécessité de cloisons étanches en cette partie. Aujourd'hui on a adopté pour la coque la tôle d'acier avec varangues fortement reliées.

Dans les pays neufs, où le transport est coûteux, il y a souvent économie à construire des bateaux en bois, en prenant des précautions contre l'incendie.

Si le fond est plat, il y aura de chaque côté une pompe d'épuisement ; mais il vaut mieux lui donner une légère pente vers l'axe et n'installer qu'une pompe centrale.

Comme matériaux du beffroi, de l'élinde, on emploiera de la forte tôle et des cornières rigides. Il est bon de fermer aussi par de la tôle la face supérieure de l'élinde qui porte les galets en fonte dure sur lesquels roulent les godets.

La partie délicate, c'est le maillon de la chaîne dragueuse, ainsi que les goupilles d'articulation ; ils exigent du fer doux très fin ou de l'acier forgé. Ces pièces s'usent beaucoup.

Sous l'élinde, la partie libre de la chaîne dragueuse est supportée par un tambour de renvoi, qui l'écarte des bords du papillon et l'empêche de s'y accrocher. Cette disposition permet d'abaisser l'axe des engrenages supérieurs et de réduire au strict nécessaire la hauteur d'élévation des déblais, qui est toujours considérable.

Le tourteau inférieur, qui s'use également beaucoup, est en fonte trempée ou en acier fondu. L'axe est porté sur des tourillons réunis à l'élinde par des chapes faciles à enlever. Le démontage de toutes les pièces doit d'ailleurs être très aisé, car le chômage d'un outil si exposé est coûteux.

Les transmissions de mouvement sont aussi simples que possible ; nous en avons toujours exclu les engrenages coniques, qui s'écartent dans les efforts extraordinaires.

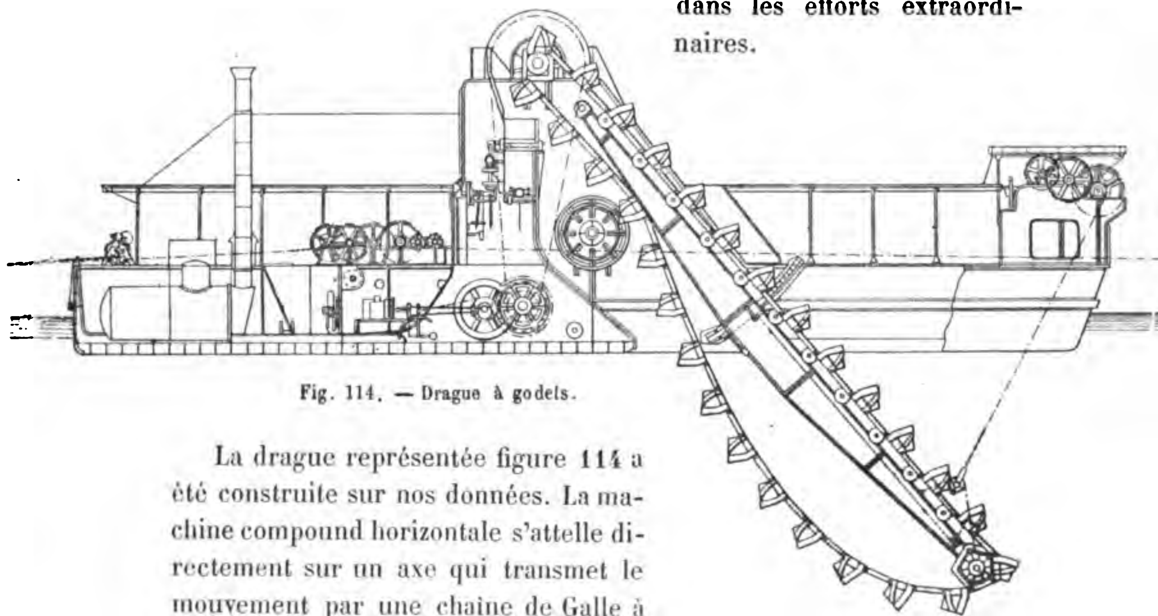


Fig. 114. — Drague à godets.

La drague représentée figure 114 a été construite sur nos données. La machine compound horizontale s'attelle directement sur un axe qui transmet le mouvement par une chaîne de Galle à la roue à cames placée sur l'arbre du tourteau supérieur. Cette transmission est élastique et amortit les chocs ; les maillons sont articulés par l'intermédiaire de bagues en acier manganèsé souvent remplacées.

Pour les dragues qui travaillent dans la roche, les pièces sont soumises à des efforts exceptionnels, qui occasionnent des ruptures fréquentes. Il est de bonne pratique de localiser ces ruptures, afin d'y remédier

rapidement. A cet effet, toutes les roues de transmission de mouvement sont en acier fondu, excepté une qui se fait en fonte, de façon qu'elle soit un peu plus faible que les autres ; c'est elle qui casse toujours et tout est disposé pour la remplacer aisément.

On place aussi dans ce cas sur le bateau une grue destinée à enlever des godets les grosses pierres dès qu'elles sortent de l'eau.

L'inclinaison la plus favorable de l'élinde est à 45°; elle ne doit guère dépasser 60° avec la verticale, ni se rapprocher de l'horizontale, à moins que l'appareil n'ait à s'ouvrir lui-même un chemin en eau peu profonde.

Les godets sont souvent maintenant en acier fondu; ce système n'est pas à recommander pour les pays où les réparations sont difficiles; est préférable la tôle d'acier très forte, avec des ceintures rivées de 20 millimètres d'épaisseur, dont il y aura un grand nombre de rechange.

Dans les sols faciles, les godets de grande capacité, de $\frac{1}{2}$ à 1 mètre cube, sont avantageux ; il en passera de 16 à 18 à la minute. Dans les terrains durs, au contraire, on réduira contenance et vitesse à la moitié. Les transmissions sont prévues pour ces changements.

Le roc tendre est attaqué par des crocs en acier, en défenses d'éléphant, alternés avec les godets; ils jouent le rôle du coutre de la charrue.

Manœuvre. — Les dragues travaillent sur six chaines : une pour l'avancement, une de maintien et de recul, quatre pour le déplacement latéral ou *papillonnage*. Les deux premières demandent une grande solidité.

La manœuvre de chacun des organes se fait par une machine spéciale, alimentée cependant par la même chaudière. Les treuils, le *papillon* qui reçoit les déblais, peuvent aussi être actionnés à la main ; on évite ainsi le chômage en cas d'avarie. Le dernier organe, dont la manœuvre est pénible, s'embraye aisément par un cône de friction.

Pour draguer, on tend d'abord les chaines fixées à des ancres mouillées à la plus grande distance possible. L'élinde est alors abaissée, tout en faisant marcher la chaine dragueuse. Les godets raclent peu à peu le fond ; quand ils remontent pleins, la descente de l'élinde est arrêtée et l'on papillonne d'abord dans un sens, puis dans l'autre. Tout le front d'attaque étant excavé, la chaine d'arrière est légèrement filée, et l'on recommence en *embraquant* celle d'avant.

Aux Portes de Fer sur le Danube, la drague était maintenue par quatre chaînes latérales, de telle sorte que les mouvements s'exécutaient dans des directions perpendiculaires et que les parties draguées pouvaient toujours être déterminées avec précision. Cette précision avait un grand intérêt, le prix de revient étant considérable à cause de la difficulté du travail.

Il a été constaté dans ces dragages que pour l'enlèvement des roches au milieu de courants, la drague, d'une solidité exceptionnelle, doit travailler vers l'aval, parce qu'autrement les guides et chaînes subissent des efforts tels qu'il en résulte de fréquentes ruptures, tandis qu'avec ce dispositif, la force du courant aide les godets à mordre. Les dépenses ont été de beaucoup réduites avec ce procédé qu'on imitera donc dans les circonstances analogues.

Dans le sable pur, la couche attaquée peut atteindre 3 mètres ; dans les autres terrains, l'expérience seule indique le meilleur mode d'opérer. Le dragage est trop souvent confié à des contremaîtres inexpérimentés ou routiniers ; l'ingénieur doit le surveiller de très près, car il est possible de diminuer le prix de revient dans d'énormes proportions.

L'inclinaison des couloirs est très importante ; trop aiguë, elle élève inutilement la hauteur du beffroi et par conséquent le prix du dragage ; trop faible, elle arrête l'écoulement de certains déblais.

Quand l'épaisseur attaquée est enlevée sur toute la superficie du terrain, la drague est ramenée à son point de départ, on abaisse l'élinde et une seconde couche est attaquée.

Puissance. — On peut compter que dans les terrains ordinaires le dragage jusqu'à 8 mètres de profondeur exige un nombre de chevaux-vapeur qui varie du tiers à la moitié du volume extrait par heure, compté en mètres cubes. Pour le dérochement, il est impossible de donner aucun chiffre.

Drague à deux élindes. — Au lieu d'une seule élinde centrale, on en dispose parfois deux latérales ; cette disposition donne l'avantage d'approcher de très près les murs de quai, par exemple. On travaille alors seulement avec l'une des élindes.

Il est difficile d'accoupler les deux chaînes dragueuses ; leur indépendance presque obligatoire entraîne à des complications de transmissions ; aussi, sauf les cas spéciaux comme celui indiqué ci-dessus, préfère-t-on en général les machines à élinde unique. Pourtant sur la Tyne,

où ont été exécutés d'immenses dragages, l'ingénieur regarde l'instrument à élinde double comme économique. Il faut en tout cas un personnel expérimenté.

Drague à cuiller (*Dipper Dredge*) (fig. 115). — L'appareil se compose d'un grand godet en tôle, porté par un long manche en bois et suspendu par un palan à une grue installée à l'avant du bateau; à l'arrière sont deux treuils actionnés par une machine à vapeur. La chaîne du palan, guidée par des poulies de renvoi, s'attache à l'un de ces treuils.

La grue peut effectuer un mouvement de rotation, étant portée sur un pivot et munie un peu au-dessus d'une grande roue horizontale commandée par une chaîne sans fin qui s'enroule sur un tambour placé à l'arrière.

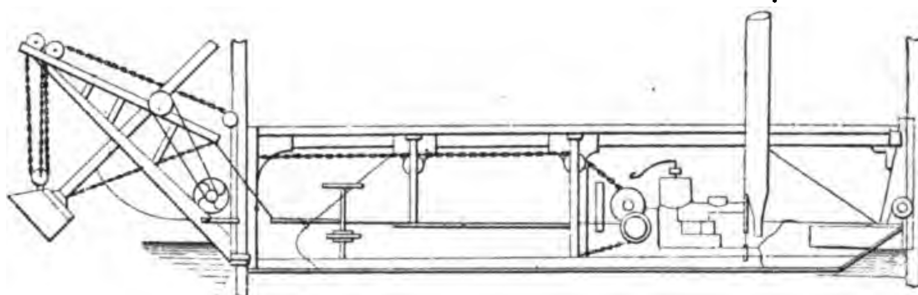


Fig. 115 — Drague à godet unique.

Le manche de la cuiller est armé à sa face inférieure d'une crémaillère qui s'engrène avec un pignon placé sur un arbre horizontal porté par le bras supérieur de la grue. Une chape avec galet force le manche à maintenir sa crémaillère contre le pignon, dont l'arbre peut recevoir un mouvement de rotation par l'intermédiaire d'une chaîne de Galle et d'un pignon inférieur commandé par un tourniquet.

Le manche est articulé sur la cuiller et varie d'inclinaison avec elle, au moyen de chaînes ou de bras également articulés percés de trous où passent des boulons. Il peut être ramené en arrière par une chaîne enroulée sur un treuil.

Pour draguer, on laisse la cuiller tomber au fond; avec la chaîne de levage, on la force à mordre. Le godet plein, le manche se relève par le tourniquet; la cuiller étant à la hauteur voulue est amenée, par la rotation de la grue, au-dessus du chaland à déblais; le fond du godet étant ouvert par un déclanchement, il se vide et l'on recommence.

La manœuvre complète exige une minute et s'exécute par trois hommes. Cette drague est presque la seule employée aux États-Unis.

Pan American (fig. 116). — Il a été construit récemment pour le dragage des grands lacs de l'Amérique du Nord une drague à godet unique de dimensions colossales, le *Pan American*. Le godet a 12 mètres cubes de capacité. La coque mesure 41,45 × 12,90 × 4,10 *m*. Les manœuvres s'exécutent par quatre béquilles dont les dimensions sont les suivantes :

Deux à l'avant de 15,25 *m* de longueur et 1,20 × 1,20 *m* d'équarrissage.

Deux à l'arrière de 15,25 *m* de longueur et 60 × 60 *cm* d'équarrissage.

Elles reçoivent le mouvement du moteur principal par l'intermédiaire de poulies.

La cuiller est manœuvrée par un câble en acier de 64 *mm* de diamètre. On compte qu'une opération complète à 7,60 *m* de profondeur s'exécute en 40 secondes.

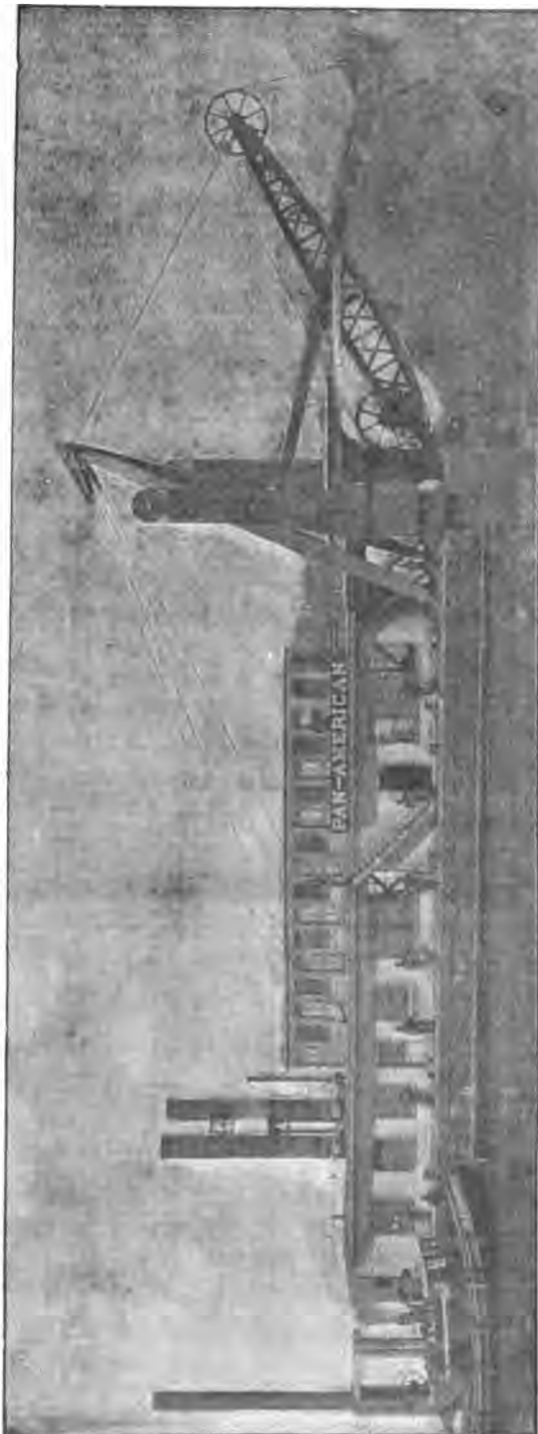
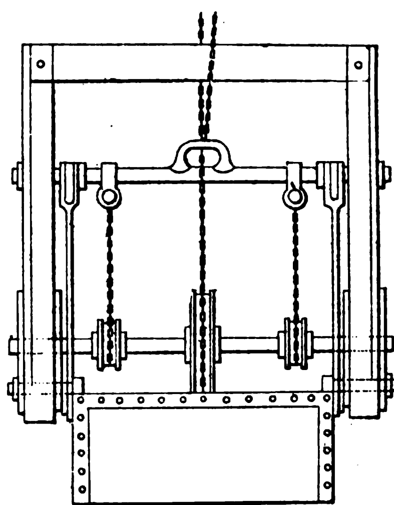


Fig. 116 — La drague *Pan American*.

Dragué à mâchoires (*Clam shell*). — La drague à mâchoires consiste dans la réunion de deux quarts de cylindre articulés, qu'on écarte pour les faire pénétrer dans le sol sous l'action de leur propre poids et que l'on ferme pour les relever pleins. Cet organe est suspendu à l'extrémité d'une grue portée sur bateau. Le type est la drague Cumming et Morris, des États-Unis. (fig. 117). Le mode de fermeture



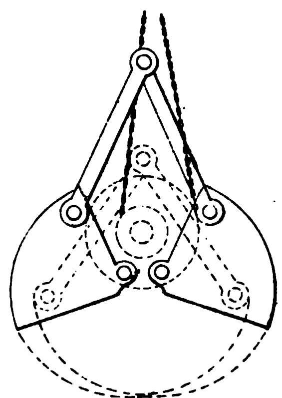


Fig 117. — Drague à mâchoires.

par les chaînes est très varié et différencie les divers systèmes. La drague Priestmann, répandue en Angleterre, est de ce modèle.

Aux États-Unis, on a en général remplacé les mâchoires cylindriques

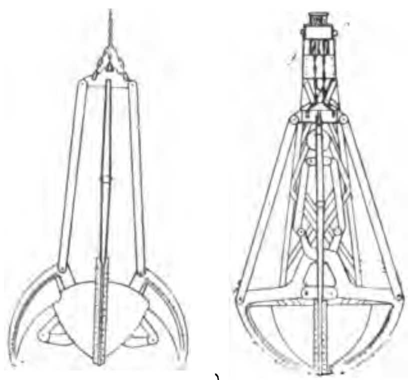


Fig. 118. — Drague à mâchoires sphériques.

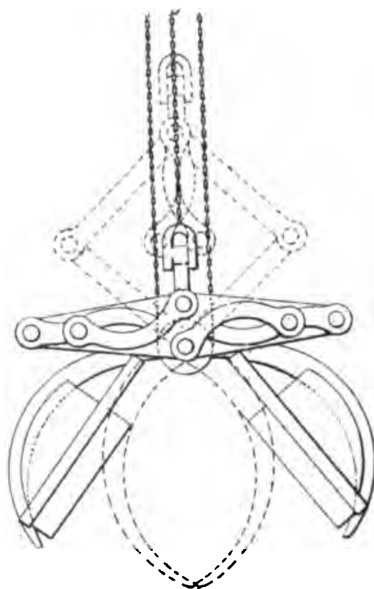


Fig. 119. — Grappin Holroyde.

par un ensemble de triangles sphériques (fig. 118), articulés par leur base et présentant au sol leur pointe acérée. Les triangles sont au nombre de 3 à 6 ; ils pénètrent ouverts. Fermés, ils constituent une demi-sphère, dont la capacité varie suivant les terrains de 1 à 8 mètres cubes.

Dans les sols durs, les mâchoires sont armées de dents en acier. S'il s'agit d'enlever des pierres, la carcasse se réduit à des barres de fer. Nous nous sommes servi, pour retirer de l'eau des blocs de plusieurs tonnes, du grappin représenté par la figure 119. Le dessin indique comment il est jeté sur la pierre suspendu par l'arbre inférieur et comment il est relevé fermé par la poulie placée sur l'axe supérieur.

Coque. — Les bateaux employés pour les dragues à godet unique ou à mâchoires ont comme dimensions approximatives 25 × 9 × 2,50 *m*. Pour la manœuvre on ne se sert guère de chaînes mais de béquilles, au nombre de trois, dont une à l'arrière et deux sur les côtés de l'avant. Ce sont des pieux armés de sabots pointus, enfoncés mécaniquement dans le sol. Pour avancer, les trois béquilles sont relevées ; quant au papillonnage, il s'effectue autour de celle de l'arrière.

Drague aspirante (fig. 120). — Nous donnons comme types des dragues par aspiration les *Dunkerque*, qui ont été employées avec un grand succès dans la rade de notre grand port de la mer du Nord. Ce sont des navires à hélice en fer, en même temps aspirateurs et porteurs. Leur longueur est de 42 mètres, leur largeur de 8,30 *m*, le creux de 3,80 *m*. L'espace réservé aux puits à sable mesure : longueur en haut : 17,60 *m*, en bas : 16,50 *m*. Largeur respectivement en haut et en bas : 6,45 *m* et 2,90 *m*, dimensions qui donnent au puits un volume de 240 mètres cubes ; le tonnage du bâtiment est de 330 tonnes.

Le navire dans sa longueur est partagé par des cloisons étanches en trois compartiments. L'avant renferme le logement de l'équipage, la caisse à eau, un guindeau pour touer le bateau sur son ancre et mouvoir l'élinde. Le milieu constitue le puits à sable. L'arrière contient les machines et les logements des mécaniciens. Des chambres à air, divisées en quatre compartiments par des cloisons étanches, courent de chaque côté du puits.

La machine compound est de 170 chevaux ; elle imprime 120 tours par minute à l'arbre de la pompe à sable ; elle sert également à la propulsion du bâtiment, et fait alors exécuter 106 tours à l'hélice, en déterminant une vitesse de 5 nœuds en charge.

La pompe dragueuse se compose d'un tambour en tôle où tournent deux palettes larges de 27 *cm* et mesurant 1,85 *m* de l'extrémité de

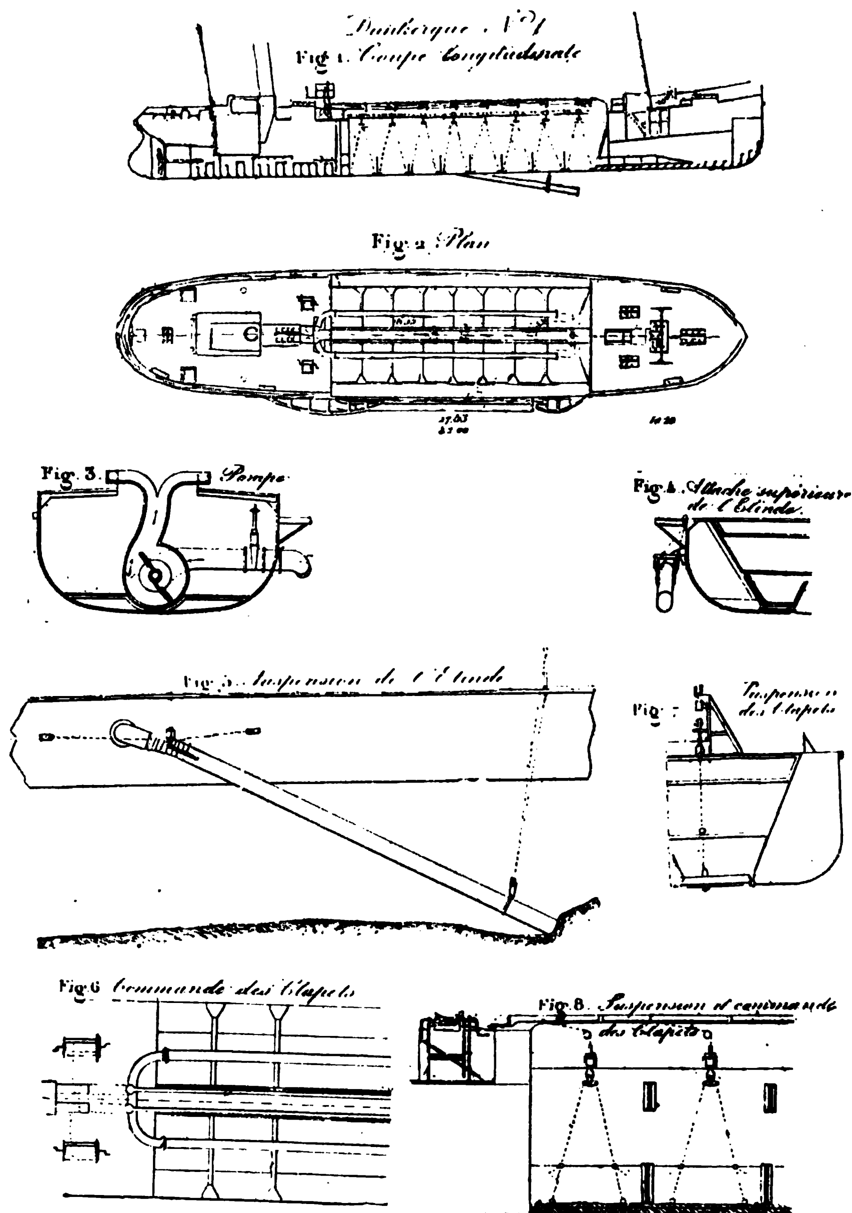


Fig 120. — Drague aspirante *Dunkerque*.

l'une à celle de l'autre. Le tambour est fixé au fond du navire, à 75 *cm*

au-dessous de la ligne de flottaison à vide, disposition qui garantit contre le désamorçage.

La pompe, qui débite 50 mètres cubes par minute, refoule le mélange d'eau et de sable par un tuyau qui part de la partie supérieure du tambour et se divise sur le pont en deux portions dirigées au-dessus du puits. Le mélange s'en écoule par des pertuis sur des toiles métalliques dont le but est d'empêcher l'agitation des dépôts déjà effectués.

Le centre de la pompe est relié par un tuyau coudé au tube d'aspiration ou *élinde*; la jonction s'opère au moyen d'un tube en double feuille de cuir, de 1,20 *m* de longueur; on obtient ainsi assez de flexibilité pour permettre à l'élinde de se mouvoir dans le plan vertical.

L'élinde est un cylindre de tôle, long de 14 mètres et de 50 *cm* de diamètre intérieur; son extrémité est munie d'un grillage composé de barreaux de fer, formant six grandes mailles destinées à empêcher l'introduction des grosses pierres.

Deux chaînes d'inclinaisons et de longueurs différentes supportent une barre horizontale normale au flanc du navire et dont l'extrémité s'engage dans un sabot en fonte scellé sur la coque; à cette pièce horizontale est suspendue l'élinde par deux bras, coudés pour éviter le tube de cuir et dont les extrémités sont également fixées à la barre. Le tuyau flexible est à l'abri de toute secousse et il n'a rien à supporter.

Le puits à sable est fermé par 16 clapets disposés sur deux rangs, et de 2,25 m^2 de surface chacun. On manœuvre une rangée à la fois au moyen d'une tringle tirée en avant ou en arrière par un treuil. C'est aussi un treuil placé à l'avant de la coque qui, par un jeu de chaînes et de poulies, élève ou descend le pied de l'élinde.

Pour draguer, on appuie l'extrémité de l'élinde sur le sol en papillonnant autour de l'ancre d'avant, en sens contraire du courant qui raidit la chaîne. La pompe aspire un mélange d'eau et de sable qui se compose de 10 à 40 % de matières solides; ce mélange tombe dans le puits où il se décante; l'excès d'eau retourne à la mer, en entraînant une partie des sédiments ténus.

Quand le vent est en sens contraire du courant, la chaîne mollit et le travail est difficile. Si le vent est très fort, on s'avance contre lui.

Dragues aspirantes américaines. — Au type des Dunkerque appartiennent les dragues marines *Charleston* et *Général Comstock*,

que le gouvernement des États-Unis emploie aux travaux de Charleston et Galveston. La dernière a une coque en bois doublée de cuivre, moins exposée à l'encrassement dans les eaux chaudes du Golfe du Mexique.

Drague de Brest. — On emploie à Brest une drague à aspiration plus grande que les *Dunkerque*. Elle a 68 mètres de longueur, 9 mètres de largeur, une capacité de puits de 350 mètres cubes et une force de 450 chevaux ; pleine elle marche à 8 nœuds.

Le chargement du puits, qui ne reçoit que 300 mètres cubes, s'opère en 25 minutes. La drague est disposée pour pouvoir refouler les déblais dans une conduite fermée de 300 mètres de longueur et qui s'élève d'une hauteur de 8 mètres.

La pompe est munie de 4 ailes, elle fait 240 tours à la minute. Son diamètre est de 1,92 *m* ; celui de l'élinde de 60 *cm*.

Drague de la Mersey. — Le *Brancker*, grande drague construite spécialement pour la barre de la Mersey, mesure 97,60 *m* de longueur, 14,25 *m* de largeur, 6,25 *m* de creux et 5 mètres de tirant d'eau, chargée.

L'élinde passe au travers d'une ouverture centrale ; latéralement sont disposées deux rangées de quatre puits pouvant recevoir chacun 250 mètres cubes (2 000 mètres cubes en tout) ; ces puits sont bordés de compartiments étanches.

L'élinde unique est desservie par un double jeu de pompes, dont un prévu en cas d'accidents. Ce sont des pompes centrifuges de 1,83 *m* de diamètre, mues par des machines à triple expansion qui leur font exécuter 150 tours à la minute. Les tuyaux ont 91 *cm* de diamètre. Ces pompes sont situées de chaque côté de l'ouverture centrale et communiquent supérieurement avec l'élinde, manœuvrée par un appareil hydraulique, et aussi à la main en cas de besoin.

Les déblais sont conduits dans les puits par des tuyaux munis de portes qu'on ouvre de plus en plus à mesure qu'elles s'éloignent des pompes, de sorte qu'avec la pratique on arrive à remplir les puits simultanément. Ils sont vidés par un système spécial et nettoyés par des jets d'eau dont l'un est lancé au centre même de la soupape de fermeture et les autres sur les côtés.

Le remplissage des puits s'opère en 40 minutes ; le rendement est par conséquent de 3000 mètres cubes par heure et s'élève même à un chiffre plus important là où le sable est pur.

Le tube en cuir a été supprimé. L'élinde est réunie à la pompe par un joint à rotule qui permet les mouvements d'ascension et de descente ; elle peut être abaissée jusqu'à 13,50 *m* et se termine par une ouverture coudée à angle droit, qui s'appuie bien contre le sol.

Une seconde drague pareille au *Brancker*, le *G. B. Crow*, a été mise en service en 1896.

Dans un chapitre spécial les résultats obtenus par ces instruments seront indiqués.

Type Reliance. — Les trois dragues marines qui ont creusé à 9 mètres les chenaux d'approche de New-York avaient pour type la *Reliance* dont les dimensions sont : 48 × 11,25 × 5 mètres. C'est un navire muni d'une double hélice et de machines compound. La contenance du puits à déblais était de 500 mètres cubes. L'appareil dragueur se compose d'un double jeu de pompes aspirantes indépendantes ainsi que tous leurs accessoires; chacune a son tuyau d'aspiration d'un côté.

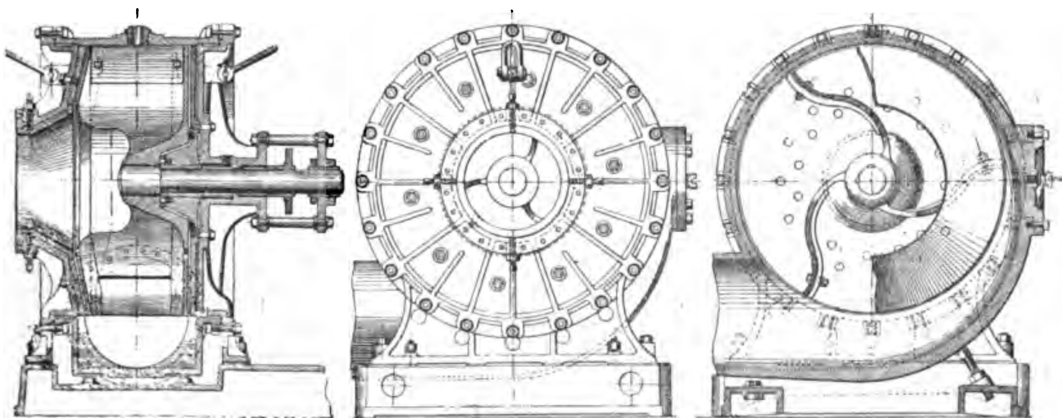


Fig 121. — Pompe Cataracte.

Les pompes, du système « Cataracte » de M. J. Edwards (fig. 121), centrifuges, placées au centre du bâtiment, sont munies de trois palettes. La jonction de l'élinde avec le tuyau d'aspiration de la pompe se fait par un tube de caoutchouc de 3,60 *m* de longueur ; l'élinde, tout compris, a 18 mètres de longueur et un diamètre de 45 *cm*.

La section de caoutchouc est supportée par trois chaînes qui lui épargnent tout effort; l'extrémité de l'élinde est munie d'un racloir pour désagréger le sable.

Ces dragues ont enlevé 3 270 000 mètres cubes de déblais ; les puits étaient remplis de 450 mètres cubes en 50 minutes ; le rendement est même arrivé à 720 mètres cubes par heure.

Drague von Schmidt.— On a vu que les dragues du type *Dunkerque* ne possèdent aucun organe pour désagréger le sable ; des expériences tendent à prouver que ces engins sont inutiles ; cependant sur de nombreuses pompes aspirantes existe un trépan rotatif, dont le premier modèle a été appliqué sur la drague von Schmidt, à Oakland, en Californie.

L'aspiration s'effectue par un ensemble de tuyaux s'emboîtant télescopiquement ; le dernier s'élargit en un vaste entonnoir excentrique, où pénètre suivant l'axe un arbre vertical, cylindrique à sa partie inférieure, mais carré en haut, de sorte que l'engrenage qui le fait tourner n'a pas besoin d'être claveté. Cet arbre porte une roue horizontale sur le pourtour de laquelle sont disposés des couteaux qui en tournant désagrègent le sol.

Les appareils de désagrégation usités par divers constructeurs sont très nombreux ; le plus souvent, ils sont disposés en troncs de cône ; nous en avons employé un, il y a longtemps, et avec succès, pour un terrain argileux, le pire des sols qu'on puisse avoir à draguer.

Dragues du Mississipi. — Sur ce fleuve, où les volumes extraits sont énormes, les dimensions des appareils tendent à augmenter sans cesse. Voici le résumé des dernières machines construites :

Dragues	Longueur	Largeur	Creux	Année de mise en service
Alpha	42m70	11m00	2m45	1895
Bêta	65, 30	17, 70	2, 29	1896
Gamma	42, 10	11, 60	2, 45	1897
Delta	53, 40	11, 60	2, 45	id.
Epsilon . . . . } Zéta . . . . . }	48, 00	12, 20	2, 30	1898

Sauf la drague Bêta dont suit la description, les autres n'ont aucun caractère spécial.

Drague Bêta. — Cette drague colossale a dû, après une année de service, être modifiée dans plusieurs de ses parties. Actuellement, les appareils de dragage comprennent deux groupes pouvant être rendus

indépendants. Les pompes sont centrifuges, à double succion, avec refoulement au sommet. Les palettes rotatives ont 2,10 *m* de diamètre et sont à commande directe.

Chaque pompe est mue par une machine à triple expansion et condensation. Les diamètres des cylindres sont 52 ; 83 ; 96 et 96 *cm* ; la course est de 61 *cm* ; il s'accomplit 140 révolutions par minute et le nombre des chevaux indiqués est de 925.

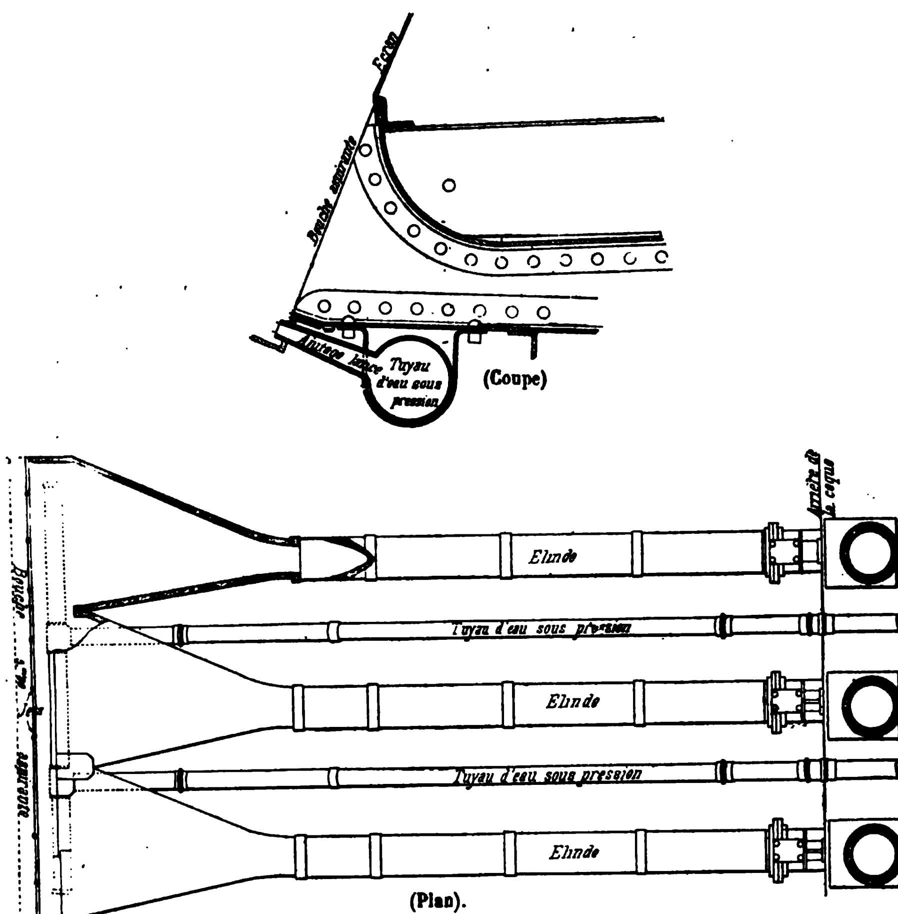


Fig. 122. — Appareil d'aspiration de la drague Béta.

Le débit d'une pompe par heure est estimé à 1 140 mètres cubes.

Les deux appareils de succion étant identiques, il suffit d'en décrire un. La pompe est alimentée de chaque côté par un tuyau coudé provenant du tube d'aspiration, qui a 86 *cm* de diamètre. Ce tube, à l'extrémité arrière de la coque, aboutit à un autre à trois branches. De

chacune, par un raccord à douilles, part une élinde ou tuyau de succion, de 8 mètres de longueur.

Il y a donc réellement trois élindes, de 60 *cm* de diamètre. Leur extrémité inférieure s'élargit en cloche aplatie, de façon à se réunir et à présenter une bouche aspirante de 5,80 *m* de largeur sur 60 *cm* de hauteur (fig. 122).

Les bouches aspirantes des deux pompes sont en prolongement l'une de l'autre, de sorte que la drague peut creuser un chenal de 12 mètres de largeur.

L'élinde de chaque pompe forme un ensemble rigide suspendu à une chèvre et qui peut être abaissé ou relevé par des treuils à vapeur.

La coque porte à l'avant une béquille de 60 *cm* de côté et 12 mètres de long, pour l'ancrer au besoin. Elle est manœuvrée par une machine spéciale.

Quatre chaudières indépendantes fournissent 1 500 chevaux-vapeur; le tirage forcé est nécessaire en pleine marche.

Les tuyaux d'évacuation, de 80 *cm* de diamètre, ont 300 mètres de largeur et sont flottants.

La drague est éclairée à la lumière électrique; l'équipage est de 56 hommes.

Primitivement, cette drague était munie d'un trépan de douze couteaux de 75 *cm* de longueur, effectuant 25 révolutions par minute. Mais on y a promptement renoncé; il a été remplacé par un agitateur à l'eau sous pression.

Celle-ci est fournie par des pompes indépendantes; la pression varie de 3 à 7 kilogrammes par centimètre carré.

Elle est conduite à l'extrémité de la bouche aspirante des élindes par deux tuyaux de 20 *cm* de diamètre; là un tuyau coudé à angle droit de 5,80 *m* de longueur s'étend le long de la bouche et lance des jets d'eau par 18 ajutages de 25 *mm* de diamètre. Ces jets soulèvent le sable, qui se précipite dans la sphère d'aspiration. Pour éviter qu'une partie du courant ne retourne en arrière dans le chenal, la bouche aspirante est surmontée d'un écran.

Aux essais officiels, cette drague a donné 4 500 mètres cubes à l'heure dans le sable pur; mais en service courant, elle ne pourrait en donner plus de 3 000, ainsi qu'il a été dit. La première année, son rendement a été très réduit, ne dépassant guère 600 à 800 mètres cubes, à cause des difficultés de la manœuvre, encore peu connue alors; et à cause

aussi de son tirant d'eau trop élevé, qui ne lui permettait pas de faire partout son chemin.

Les dragues Delta et Zéta ont seules conservé les trépans rotatifs.

Volga (pl. 5, fig. 1 et 2). — Cette drague est construite en deux parties afin de lui permettre de passer par les canaux depuis la Baltique jusqu'à la Volga. Les deux portions peuvent travailler indépendantes ou réunies; dans le dernier cas, la largeur de la tranche enlevée atteint 19 mètres. Les dimensions d'une moitié sont : longueur : 70 mètres ; largeur : 9,60 *m* et profondeur : 2,75 *m*. Le tirant d'eau lège est de 1,22 *m* ; il est de 1,45 *m* en travail.

Le propulseur et le mécanisme de direction sont commandés par l'électricité, chaque moitié renfermant un générateur de 600 kilowatts directement réuni à une machine à triple expansion. La pompe centrifuge est mue par une machine verticale à quadruple expansion de 1 600 chevaux.

Les tuyaux de décharge ont 80 *cm* de diamètre.

Cette drague, qui coûtera 2 millions et demi de francs, doit pouvoir enlever à l'heure 3 000 mètres cubes de sable, gravier ou vase et les transporter à 200 mètres.

Le combustible sera le naphte, dont on brûlera 4,5 m^3 par heure.

Ces dragues, du système Bates, peuvent être utiles là où l'on a un gros cube à enlever sur un faible espace, mais ne sauraient convenir même pour de forts volumes s'ils sont répartis sur une grande étendue, comme pour l'entretien du canal de Suez, par exemple, qui exige l'enlèvement annuel de 785 000 mètres cubes sur 35 kilomètres, soit une épaisseur de 64 *cm* environ. Il faudrait une vitesse de papillonnage difficile à atteindre en pratique.

Drague électrique Bunau-Varilla. — A été construite pour l'extraction du ballast en Espagne, mais peut être appliquée aux travaux maritimes. Les machines productrices de l'électricité sont, dans le cas spécial, établies à terre. Tous les appareils sont actionnés électriquement par un seul homme placé dans une cabine au-dessus de la chaîne dragueuse.

Le système de manœuvre est également intéressant. Il n'y a aucune chaîne ni d'ancrage ni de papillonnage ; les mouvements sont obtenus par deux hélices. Le bateau est muni de deux béquilles placées à l'ar-

rière à 1,50 *m* l'une de l'autre, l'une sur l'axe, l'autre en dehors. Pour travailler, on laisse tomber la béquille centrale, et le papillonnage s'exécute autour, à l'aide de l'une des hélices. Le dragage exécuté dans toute la surface ainsi atteinte, le pieu est relevé, on ancre l'autre, et le bateau décrit une révolution. Quand la première béquille est revenue dans l'axe du chenal, on la fait tomber ; il est clair qu'elle se trouve alors à 1,50 *m* de distance de sa première position ; on drague de nouveau, et ainsi de suite.

Le moteur de la chaine dragueuse est de la force de 40 chevaux ; les machines sont à courant alternatif triphasé. La génératrice située à terre fournit un courant à 2 000 volts, qui est transformé sur la drague en courant à 200 volts.

Drague à effet multiple. — Lorsqu'on n'a qu'une drague devant travailler dans des terrains différents ou quand le déchargement ne se fait pas toujours au même point, on peut sur une même coque installer plusieurs appareils : une chaîne à godets d'une part, et d'autre part une pompe aspirante. A l'occasion, la pompe peut servir au refoulement des matières draguées. Ainsi sur l'Escaut la drague aspirante « Schelde II » suivant les circonstances, vide un chaland placé le long de son bord, remplit son propre puits ou le décharge en refoulant les matières dans une tuyauterie, etc. Ces combinaisons varient au gré des conditions spéciales du dragage.

La drague « Vera-Cruz » construite pour le port de ce nom au Mexique, est un navire de mer, capable d'extraire par heure 300 tonnes de déblais de la profondeur de 10 à 11 mètres. Outre une chaîne dragueuse ordinaire dont les godets sont munis de dents — système peu à recommander — elle porte une pompe centrifuge capable d'élever le sable et de le refouler dans des tuyaux à une distance de 500 mètres. Sa puissance est de 300 chevaux.

Une drague de 1000 chevaux, appartenant au gouvernement russe, est composée de la même manière.

Pulsomètre. — On a souvent employé, pour enlever des vases ou des sables ténus, le pulsomètre. C'est un appareil qui, vu sa rusticité et sa facilité d'installation, est parfois économique malgré la dépense considérable de vapeur qu'il nécessite. Il est évident que ce ne peut être que pour un dragage de peu d'importance. Lorsque le cube à en-

lever est assez considérable, on a avantage à installer des machines plus coûteuses, mais dont les dépenses de marche sont moins fortes. Et l'on peut dire que cet avantage croît avec le volume à extraire.

Dragage par affouillement. — Quand le dragage se fait dans un courant capable d'entraîner les matériaux mis en suspension, on peut simplement faire agir sur la barre l'hélice d'un vapeur. En cinq jours, en 1886, il a été creusé à travers une barre sur la rivière Willamette (Orégon) un chenal de 450 mètres de longueur sur 60 mètres de largeur, qui a été approfondi de 4,50 à 6,70 *m*, en faisant tourner sur place la machine d'un vapeur de 2000 tonneaux, calant 7,20 *m*. Il a été ainsi enlevé 6 000 mètres cubes ; l'opération a été coûteuse, car elle est revenue à 16 000 francs, mais la location du navire entrait dans ce prix pour 12 500 francs.

On a aussi employé aux États-Unis des râteaux articulés à l'arrière d'un bateau, et qui raclaient les bancs. Des moitiés de vieilles chaudières composaient les râteaux.

Sur la Tay, à 5 kilomètres en aval de Dundee, le chenal a été élargi de 150 mètres, par la mise en mouvement des sables au moyen d'une hélice fixée à l'extrémité de l'élinde d'une drague. Ce résultat a été obtenu économiquement en trois mois.

Sur la Charente, les abords des formes de radoub et des cales de lancement sont nettoyés de la vase par un râteau fixé à un ponton qui se déhale sur une chaîne. Sur les passes du Carnet et de Donges, on utilise un bateau affouilleur de 40 ×6 mètres auquel sont attachés sept râteaux de 4,60 *m* ; le chaland se place en travers du courant, qu'il descend remorqué ; il faut au moins la vitesse de 50 *cm* par seconde pour donner un résultat.

Sur le canal de Basse-Loire, le dévasement est aussi produit par un chaland traînant un râteau en cuiller, et halé par une locomobile au moyen d'une chaîne noyée.

Sur le Stour, le procédé est celui usité dans les égouts de Paris. Un ou plusieurs chalands sont munis à l'arrière de châssis pleins mobiles, dont la largeur est celle de la rivière, 15 mètres. Ils s'abaissent verticalement et déterminent une retenue d'eau suffisante pour pousser le bateau, tout en entraînant une partie des sédiments. La vitesse acquise par l'ensemble est suffisante pour que la même opération, répétée plusieurs fois, arrive à nettoyer près de 2 kilomètres par jour.

Affouilleur Wheeler. — Cet instrument, employé pour l'approfondissement du port de Boston, situé sur le Witham en Angleterre, se compose d'un cône de 1,20 *m* de diamètre à sa partie la plus large, et portant des couteaux sur sa périphérie. Il est descendu dans un puits pratiqué à l'avant du bateau et tourne à 100 tours par minute. Le chaland mesure 14 mètres de longueur, 4 mètres de largeur et 1,80 *m* de creux.

Le couteau est actionné par une paire de machines compound de 35 chevaux, servant aussi à abaisser le châssis porteur du couteau, à la manœuvre des treuils et à la propulsion.

L'appareil peut travailler même dans l'argile dure et a donné des résultats économiques.

Ecopes. — Certains sols sont très difficiles à attaquer. Aux nouveaux travaux de l'arsenal de Keyham, on avait à enlever une couche épaisse de boue liquide sur laquelle les wagonnets ne pouvaient s'aventurer. En pareil cas, au canal de l'Empereur-Guillaume, on a consolidé

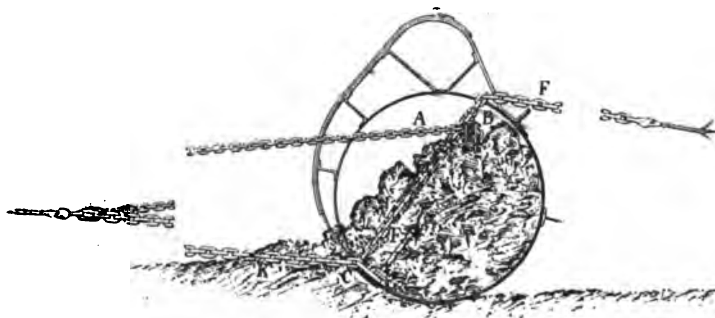


Fig. 123. — Ecope de Keyham.

la voie par un apport de sable. A Keyham on s'est servi d'écopes sphériques (fig. 123) que traînaient des chaînes mues par la vapeur. Une machine fixe attirait l'écope et la déchargeait sur des chalands ; une autre, mobile, la ramenait sur le sol à fouiller. Dans ce mouvement de retour, la sphère glissait sur le châssis dont elle était armée, comme on le voit dans la figure. On pouvait en moyenne extraire 3 mètres cubes en 10 minutes ; c'est un rendement très faible ; mais il paraît que l'appareil a rendu de réels services.

TRANSPORT DES DÉBLAIS

Les déblais extraits par les dragues sont parfois employés comme matériaux de comblement. Le plus souvent, faute de place pour les utiliser, on doit les jeter en des points où ils ne peuvent ni gêner ni revenir à leur point d'extraction. Le choix du lieu du dépôt a une grande importance. A Ijmuiden il était trop rapproché et une partie des matériaux a certainement été ramenée dans l'avant-port. Il doit être non seulement assez éloigné, mais encore se trouver à l'aval de la direction des vagues et des courants.

D'autre part, l'éloignement est une des principales causes de l'augmentation des dépenses. Il faut donc étudier avec soin le procédé à suivre.

Le transport des déblais s'opère par wagons, par chalands, toiles sans fin, tuyaux, ou par la drague elle-même.

Dragues porteuses. — Les Dunkerque déjà décrites transportent elles-mêmes leurs déblais emmagasinés dans des puits à clapets. Il existe aussi de nombreuses dragues à godets, dites dragues marines, qui sont construites de la même façon. Le moteur commande alternativement la chaine dragueuse pendant le travail et l'hélice pendant le voyage de déchargement.

Bateaux porteurs. — Le plus souvent, les déblais sont versés dans des chalands à clapets que des remorqueurs conduisent à destination

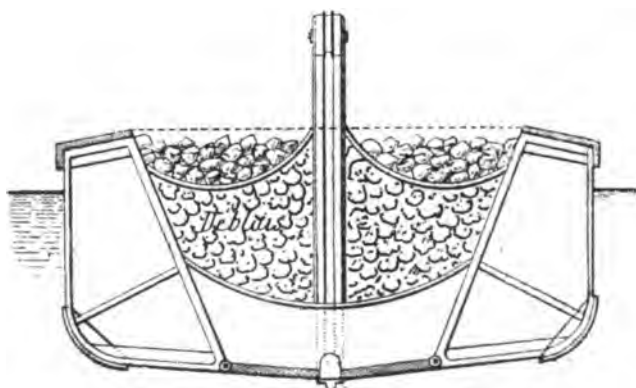


Fig. 124. — Chaland à clapets.

ou qui sont munis eux-mêmes d'un organe de propulsion. Les clapets sont manœuvrés par des chaînes enroulées sur des treuils (fig. 124).

Dans les eaux peu profondes, les clapets sont latéraux (fig. 125).

Les chalands remorqués ne diffèrent des automoteurs qu'en ce que toute la place est occupée par les puits à déblais.

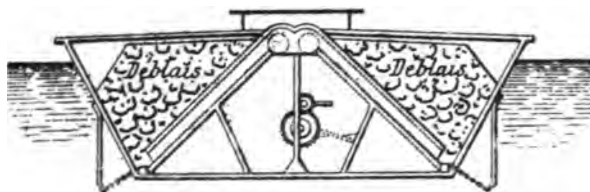


Fig. 125. — Chaland à clapets latéraux.

Les pontons Barney (fig. 126) ont 36 × 9,25 × 3,15 *m* et se composent de deux moitiés accolées, réunies par des ponts à charnières. Ils reçoivent les déblais dans l'espace triangulaire médian. Le poids de la

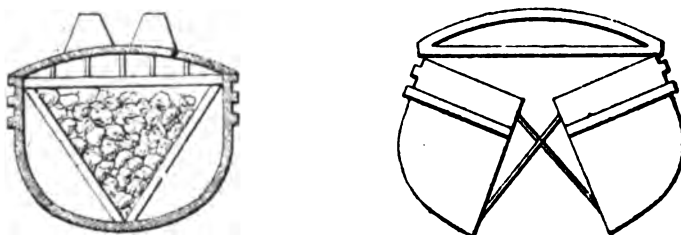


Fig. 126. — Ponton Barney.

charge tendant à faire ouvrir les deux portions, il suffit d'un faible effort pour lâcher le verrou; elles se referment d'elles-mêmes, le déchargement terminé.

Caissons. — Les déblais se déchargent aussi dans des caisses portées sur des chalands plats, une grue les enlève et les place sur des trucs attelés à une locomotive qui les emporte à la vidange. Nous avons fait construire pour une installation de ce genre la grue roulante à double effet dont la figure 127 indique le principe. Les caissons vides étaient replacés sur les chalands à mesure qu'on enlevait les pleins. L'installation du chantier et des voies ferrées est alors importante. La locomotive se trouvait devant les trains vides et derrière les vagons chargés, qu'on vidait au rivage sous le vent. Si les matières sont argileuses, la vidange des caissons n'est possible qu'avec un puissant jet d'eau.

On emploie aussi, dans ce cas, une grue à double volée, dont l'une

enlève un caisson plein pendant que l'autre en replace un vide. La grue a pu arriver à 50 révolutions à l'heure.

Au canal de Manchester, il a été reconnu que l'enlèvement des caisses et leur installation sur les trucs entraînait une grande perte de temps et exigeait le concours de plusieurs manœuvres. La drague jetait les déblais dans des bennes en tôle ayant comme dimensions : $2 \times 1,25 \times 1,45\ m = 3,60\ m^3$ en forme de troncs de pyramide, aux angles arrondis (fig. 128). Une grue les enlevait, et par un système de chaînes, les basculait et vidait dans des vagonnets.

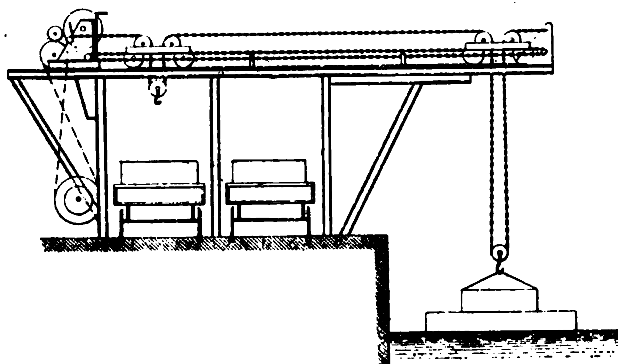


Fig. 127. — Grue double.

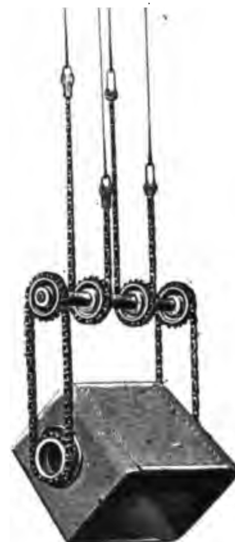


Fig. 128. — Benne de Manchester

Les chalands porteurs de caisses sont généralement conduits sous la grue par des remorqueurs ; mais au canal de Manchester, ils étaient traînés par des locomotives courant sur une voie latérale.

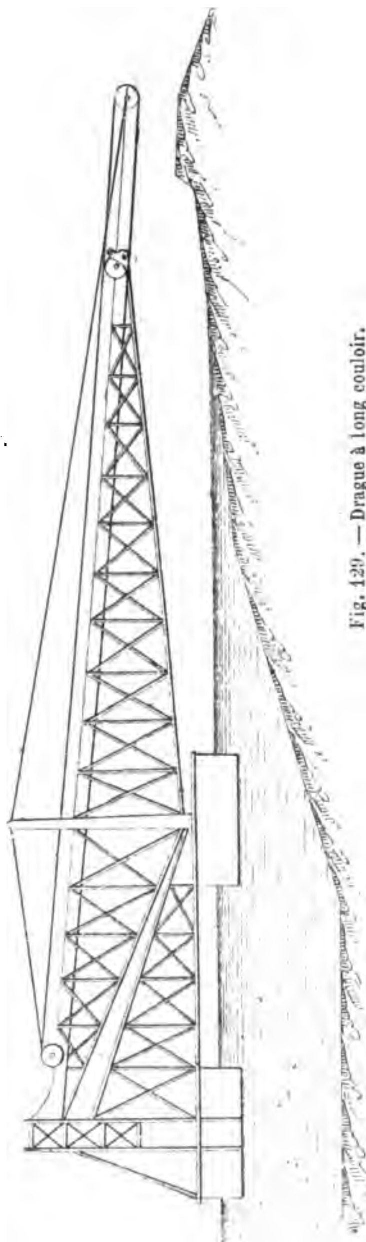
Chaque chaland portait dix de ces bennes. Une grue en déchargeait 312 en neuf heures et demie de travail, soit un rendement de 200 tonnes à l'heure. Il y avait le long du canal neuf grues occupées à ce travail, pratiqué dans des conditions très économiques.

Longs couloirs (fig. 129). — Au canal de Suez, dont le plan d'eau est limité, les déblais étaient rejetés sur les berges désertes par des couloirs d'une longueur de 18 mètres à laquelle faisaient équilibre des contrepoids suspendus à une chèvre. A la suite de la rupture d'une chaîne, on fit porter sur un chaland le long couloir, qui a pu ainsi être allongé jusqu'à 70 mètres.

Le couloir avait une section elliptique de 60 *cm* de profondeur sur 1,50 *m* de largeur ; il était consolidé par deux cours de poutres à larges

treillis reposant, au tiers environ de leur longueur, sur le fond du chaland par un essieu longitudinal. L'attache du couloir à la drague se faisait par une charnière horizontale qui permettait de varier l'inclinaison.

La drague et le chaland étaient rendus solidaires par des étais horizontaux perpendiculaires à l'axe des coques, par des chaînes parallèles aux étais et des croisées d'avant en arrière.


Fig. 129. — Drague à long couloir.

Les déblais étaient entraînés par un jet d'eau que lançaient de puissantes pompes ; des hommes les poussaient aussi au rabot, et enfin, on a essayé des palettes en bois conduites par une chaîne dragueuse sans fin, mais sans succès.

La même disposition, perfectionnée, a été employée au canal de Manchester.

Au canal de Bruges, on emploie des couloirs de **70** mètres de longueur, qui ne sont supportés que par les chaînes et haubans partant de la drague elle-même.

Élévateurs (fig. 130). — Sur les points où des berges trop élevées rendaient impossible l'usage des longs couloirs, on a employé à Suez des élévateurs. Les déblais étaient reçus dans des caisses de **3** mètres cubes, portées entre des flotteurs très bas. L'élévateur se compose de deux poutres en fer à treillis reposant dans le canal sur un chaland et à terre sur un truc

marchant le long d'une voie ferrée latérale. La poutre est inclinée à peu près au quart ; sa face supérieure porte une petite voie ferrée sur laquelle roule un chariot mû par un câble ; on accroche à ce chariot les caissons qui, arrivés à l'autre extrémité sont vidés automatiquement puis ramenés sur le flotteur. Ces élévateurs suivent la drague.

Ils sont très usités au canal de Chicago. Ceux qui sont affectés à l'enlèvement des déblais opérés à sec par les terrassiers à vapeur ou excavateurs, sont représentés par les figures 131 et 132.

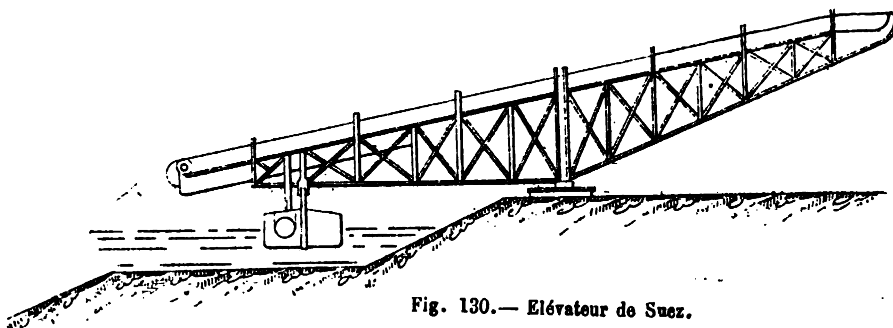


Fig. 130.— Elévateur de Suez.

Les vagonnets chargés montent sur le plan incliné, jusqu'à l'extrémité où ils butent contre des tampons. Le câble, continuant à tirer, fait basculer une plateforme autour d'un essieu central, et le wagon se décharge ; un contrepoids ramène la bascule et le chariot redescend. La sonnerie d'une cloche, mue par un levier qui touche en passant le véhicule, annonce le moment où il faut diminuer la vitesse, puis arrêter ;

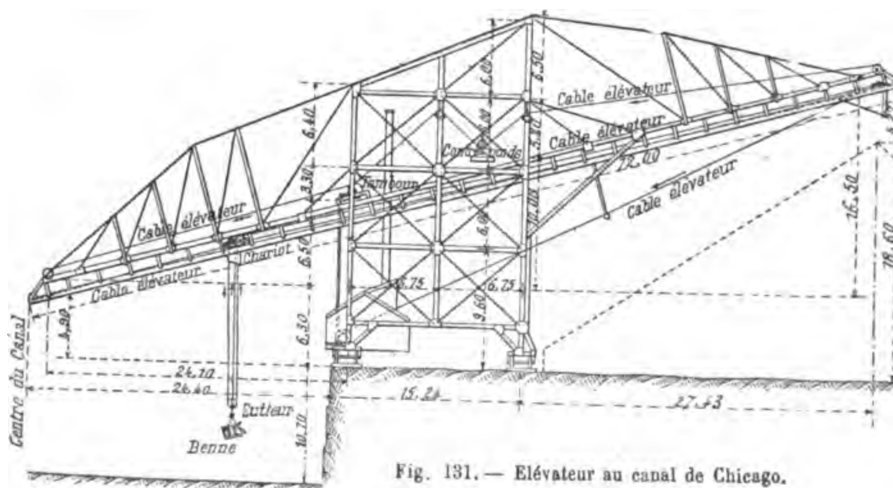


Fig. 131. — Elévateur au canal de Chicago.

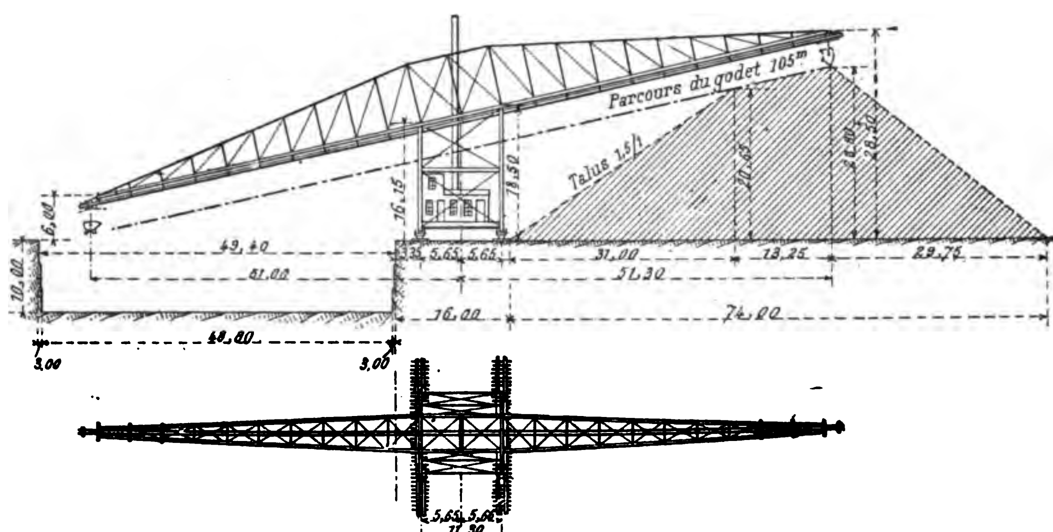


Fig. 132. — Elévateur au canal de Chicago.

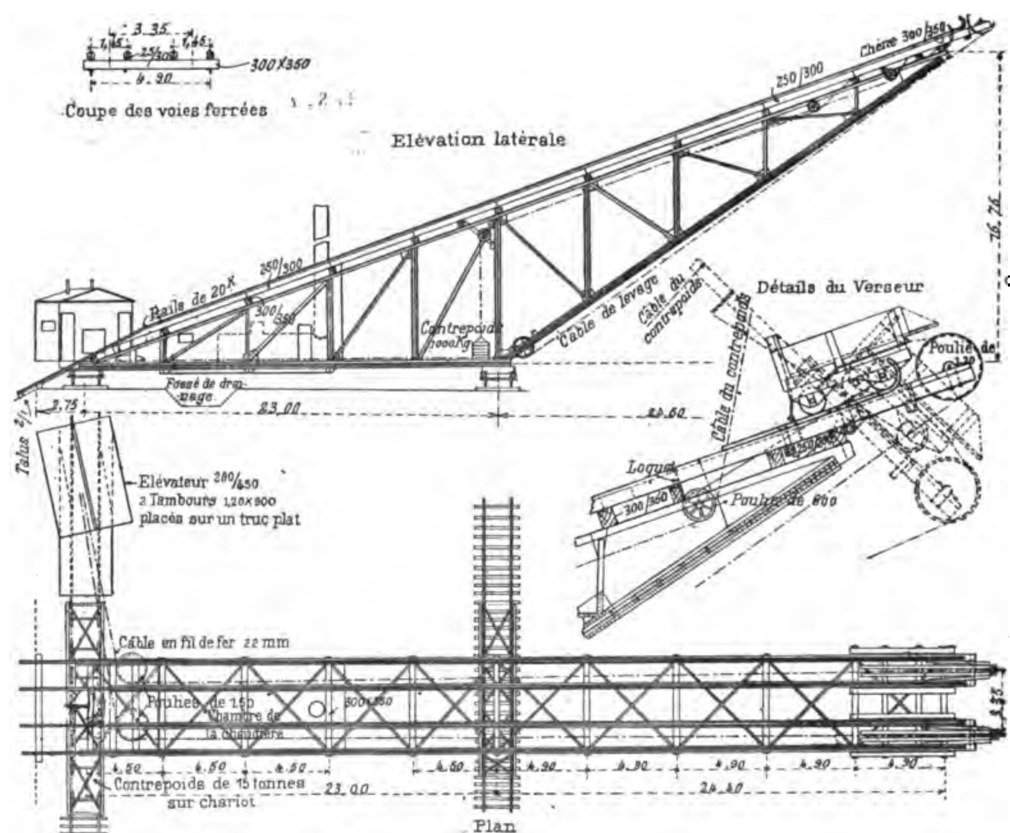


Fig. 133. — Elévateur au canal de Chicago.

une autre sonnerie indique que la bascule est revenue à sa position primitive et qu'il faut lâcher le câble du treuil.

Quand les vagonnets ne peuvent atteindre l'extrémité du *conveyor*, ce qui arrive surtout pour les portions du canal creusées à parois verticales dans le roc, on emploie des systèmes analogues à celui de Suez (fig. 133). Le *conveyor cantilever* repose sur deux trucs placés à terre, et la longueur totale de la poutre est de 73 mètres.

Transporteurs aériens. — Pour le roc également, on a appliqué au canal de Chicago le transporteur aérien, si usité en Amérique (fig. 134). Sur chaque rive on élève une tour en charpente ; les deux sont réunies par un solide câble d'acier qui sert de voie aux chariots actionnés par des cordes enroulées sur des treuils à vapeur ; les chariots s'arrêtent au point marqué pour le déchargement.

A Chicago, les tours sont distantes de 210 mètres; elles ont 24 mètres de hauteur et sont portées par des trucs de 31 mètres de longueur reposant sur 27 roues de 80 *cm* de diamètre. D'un côté du canal est installé l'appareil moteur ; sur l'autre rive, un contrepoids.

Le câble principal a 5 *cm* de diamètre et ne sert que de voie ; il y en a quatre autres pour les manœuvres, savoir : la corde sans fin pour mouvoir le chariot; le câble élévateur pour lever ou baisser la charge et dont les supports sont maintenus par un troisième, enfin le quatrième sert à déverser le chariot.

Le câble-voie peut supporter une charge de 155 tonnes; mais avec une flèche de 5 mètres et une charge de 6 tonnes, son propre effort est de 80 tonnes, ce qui explique le coefficient considérable de sûreté adopté (155 — 80 tonnes).

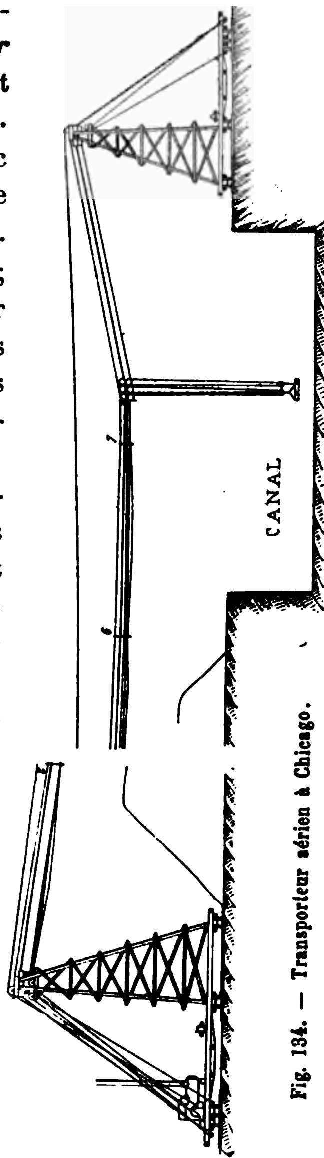


Fig. 134. — Transporteur aérien à Chicago.

Les difficultés principales de ce système consistent dans l'installation des câbles porte-supports et déchargeurs ; elles ont été pleinement résolues.

La vitesse d'élévation de la charge est de 1,25 *m* par seconde ; celle de la marche le long du câble de 5 mètres. On transporte par heure cent tonnes. Les trucs qui portent les tours sont déplacés par la machine elle-même.

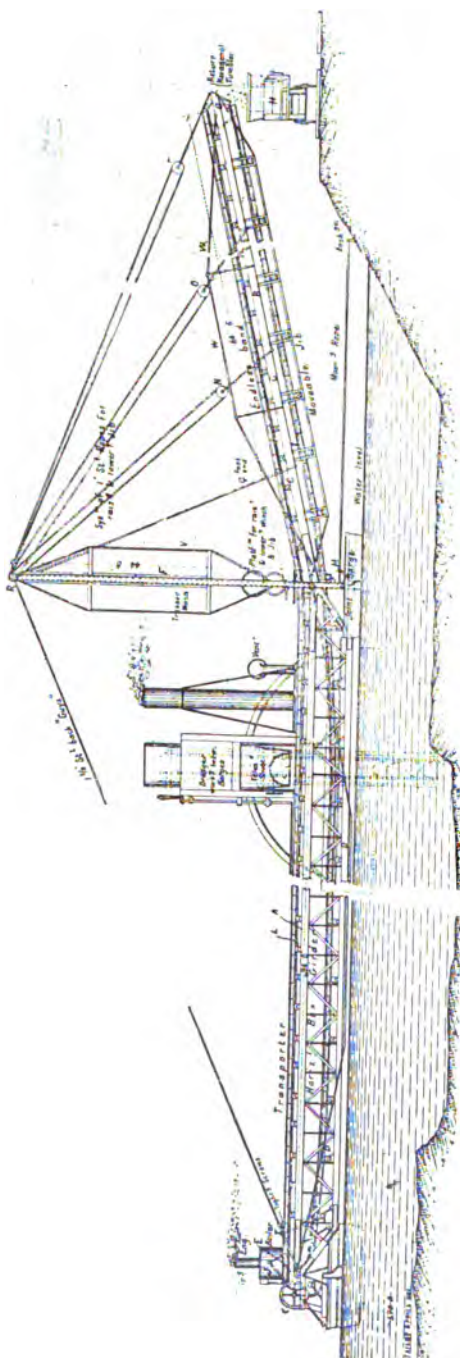
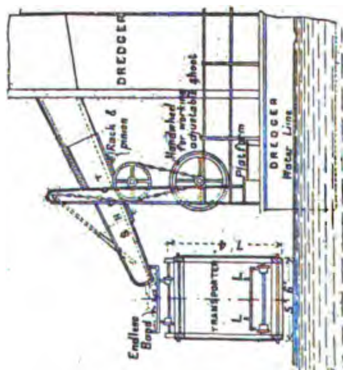


Fig. 135. — Transporteur du canal de Manchestr.

On trouve encore au canal de Chicago un grand nombre de modèles différents de transporteurs, mais beaucoup ne constituent pas un réel progrès sur les autres systèmes.

Elévateurs à norias. — Un système très usité aujourd'hui consiste à recevoir les déblais dans des bateaux-porteurs qui vont se décharger sous une chaine dragueuse portée soit sur un appontement fixe soit sur deux chalands. Les déblais sont élevés dans un long couloir où on les fait entraîner par un courant d'eau ou par des hommes armés de râteaux.



Coupe.

Toiles sans fin. — On a aussi appliqué au transport des déblais le principe de la toile sans fin, en remplaçant le tissu par des planchettes articulées. Ces appareils ont travaillé avec succès sur la Gironde. Au canal de Manchester on en a installé un sur ponton, pour remplacer un élévateur. Les figures indiquent suffisamment son mode de construction (fig. 135).

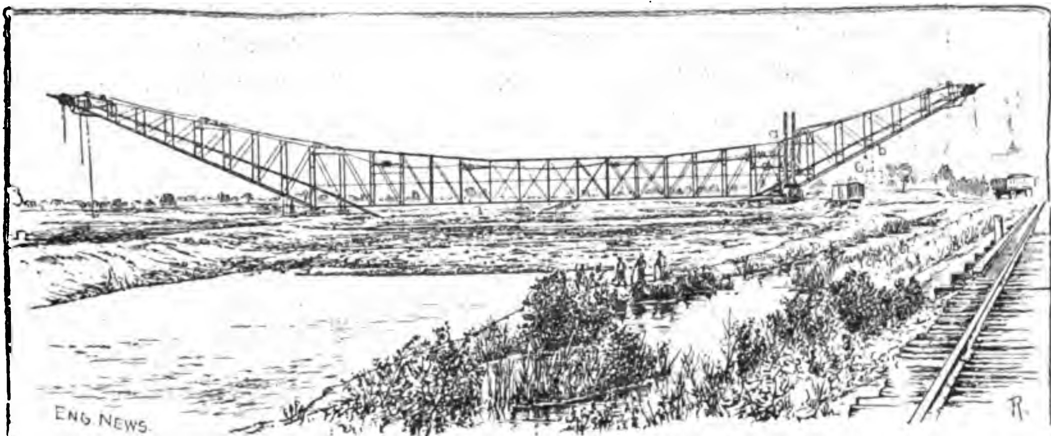


Fig. 136. — Conveyor du canal de Chicago, double cantilever.

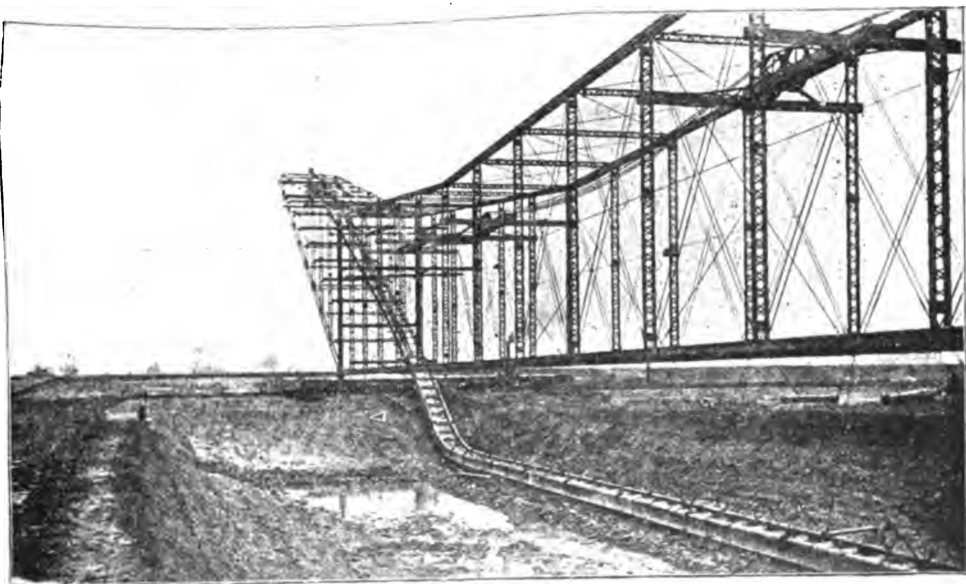


Fig. 136 *a*. — Conveyor du canal de Chicago, double cantilever.

Au canal de Chicago, on a disposé une toile sans fin d'un genre particulier sur un double cantilever, dont la longueur totale est de 200 mètres (fig. 136) et qui roule sur deux trucs. Au bout de chacun des bras existe un tambour, sur lequel s'enroule la courroie composée d'auges carrées en acier articulées sur lesquelles s'éboulent les déblais qui vont se déverser aux extrémités.

Transport par tuyaux. — On emploie également beaucoup le transport par tuyaux. Les déblais tombent dans un cylindre vertical et aboutissent à une pompe centrifuge, qui les refoule dans des tuyaux. Quand ceux-ci ont à traverser l'eau, ils sont soutenus sur des barils ou des flotteurs en bois qui servent en même temps de pont pour arriver à la drague.

Distributeur Figée. — A été appliqué aux appareils qui ont exécuté le rescindement de l'île Cazeau, sur la Gironde. Les déblais d'une drague à double élinde sont déversés dans un distributeur à ailettes dont la partie inférieure est traversée par un courant d'eau issu d'une pompe rotative ; ce courant les entraîne dans une conduite de 35 *cm* de diamètre. Le sol est très argileux. La caractéristique de cet appareil est

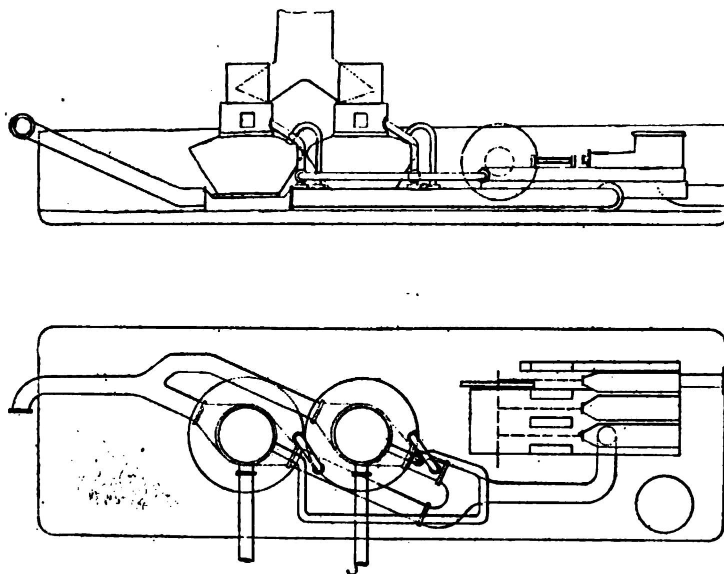


Fig. 137. — Transporteur Bony.

donc que les déblais sont refoulés sans passer par la pompe elle-même. Avec 60 chevaux de force, on obtenait par jour 400 mètres cubes nets,

la partie solide n'entrant que pour 5 à 7 % dans le mélange refoulé. Le sol très argileux d'abord, condition défavorable, est devenu ensuite sablonneux dans les couches profondes, et il en est résulté une notable amélioration dans le rendement.

Le *transporteur universel* de M. Bony (fig. 137) se compose de deux chaudières verticales où les déblais sont versés alternativement par le jeu d'un papillon. Des pompes y envoient de l'eau sous pression et les refoulent dans une conduite ; au canal de Tancarville, les déblais étaient ainsi transportés à 280 mètres de distance et avaient à franchir une hauteur de 5 mètres.

A Oakland, la *drague von Schmidt* refoulait le mélange d'eau et de déblais dans des tuyaux en fer forgé reliés par des bagues de caoutchouc et portés sur des pontons ; la longueur de la conduite a atteint jusqu'à 800 mètres. Les meilleurs résultats ont été obtenus quand la proportion de matières (argileuses) était de 15 % de mélange. On déchargeait par jour en moyenne 1 000 mètres cubes ; le maximum a été de 1 900 mètres cubes.

A Milwall Docks, Londres, M. Duckham a remplacé le jet d'eau des pompes par de l'air sous pression ; les déblais sont reçus dans des réservoirs cylindriques à bord même de la drague, et poussés dans une conduite de 45 *cm* de diamètre et de 135 mètres de longueur. Il importe que les tuyaux injecteurs ne soient pas trop petits, car autrement l'air passe en filets dans le liquide sans le repousser.

Sur la Garonne, au moyen d'un élévateur flottant les déblais sont refoulés à 1 800 mètres et la distance dépassera 2 kilomètres. La machine motrice développe 600 chevaux ; elle commande deux pompes rotatives conjuguées de 40 *cm* de diamètre, qui aspirent les matières déversées par les dragues dans les chalands et les refoulent à terre. Les vases sont délayées par une autre pompe rotative de 30 *cm* de diamètre.

Le rendement est augmenté si la pompe foulante marche d'un dixième plus vite que l'aspirante et c'est la vase qui donne les meilleurs résultats.

Par jour environ 2 500 mètres cubes de déblais sont refoulés en moyenne, mais on atteint parfois un travail double.

Comparaison des divers systèmes de dragues. — La drague à godets, universellement employée en Europe, offre plusieurs avantages : elle régularise le fond, résultat parfois très important ; elle se plie à toutes les natures de terrains, depuis la vase jusqu'au roc tendre ;

elle enlève aussi très bien les débris des mines, y compris des blocs de plusieurs tonnes. Elle offre l'inconvénient d'élever les déblais à une hauteur supérieure à celle qui est strictement nécessaire; ses rouages nombreux, sa lourde chaîne dragueuse occasionnent des frottements considérables, et moins de la moitié de la force de la machine est utilisée; mais la continuité de son action compense la majeure partie de ces inconvénients.

Le choix à faire entre la drague fixe et la drague porteuse dépend des conditions locales. Si la distance de transport est supérieure à 8 kilomètres on ne peut songer à inutiliser l'appareil pendant un temps trop long; en général même, il y aura intérêt à adopter la drague fixe; mais si elle se trouve sur le passage de nombreux navires, les chalands qui l'accostent constituent une grande gêne, et la porteuse reprend l'avantage.

La drague à godet unique *(dipper-dredge)* peut être employée dans tous les terrains, mais présente surtout un avantage marqué pour la vase, qui fuit devant le collecteur des autres systèmes. Elle n'élève les déblais qu'à la hauteur nécessaire, et se prête bien à toutes les sujétions du travail; ses organes sont simples, d'une réparation facile; elle n'éprouve pas dans les terrains durs et l'enlèvement des déblais des mines les chocs brutaux de la drague à godets et désagrège plus facilement le terrain; mais elle utilise encore moins bien la force motrice et ne dresse pas le sol qui reste creusé de trous. Elle ne peut, encore moins que la drague à échelle, opérer dans la mer avec de la houle: les godets dans l'un, la cuiller dans l'autre, frappent contre le fond et le travail diminue en même temps que les chances d'avarie augmentent.

Les Américains eux-mêmes ne contestent pas que le *dipper* n'est nullement supérieur à la drague à échelles; s'il est si répandu parmi eux, c'est qu'il est très économique de prix d'achat. Il est rare que là-bas les entrepreneurs aient de grands travaux à exécuter et ils se contentent de leur machine à bon marché.

La drague à mâchoires ou *clamshell* (*grab* des Anglais) drague à toute profondeur, s'approche tout près des ouvrages, est assez économique; mais on n'en tire un bon parti ni dans les terrains résistants ni dans le sable pur. C'est la drague des sols vaseux faciles, et des endroits où il faut draguer au pied d'obstacles verticaux.

Pour le sable, la pompe suceuse est supérieure à tous les points de

vue ; elle se déplace aisément, se met vite à l'œuvre, travaille mouillée sur une ancre, ou en marche si elle a à opérer sur une certaine longueur.

L'élinde est dirigée soit vers l'avant soit vers l'arrière ; sur la Loire une des dragues change même à volonté cette direction. L'élinde travaillant par derrière est moins sujette aux engorgements, mais ne peut aussi bien désagréger le sol ; quand celui-ci est assez meuble, il y a parfois avantage à travailler de cette façon.

Les dragues suceuses sont très rustiques ; elles élèvent quelquefois des objets très volumineux, pierres, boulets, etc., sans se briser.

Une agitation modérée des eaux est plutôt favorable au rendement des dragues aspirantes. Sur l'Adour, on a pu draguer la barre avec des vagues de 2 mètres de hauteur en suspendant la tête de l'élinde par un joint à la Cardan, qui lui permet de prendre une position quelconque, et en plaçant la crépine à l'extrémité d'un tuyau qui, sous le choc, rentre télescopiquement dans le tube de l'élinde ; ce glissement est réglé par des ressorts Belleville.

Mais la pompe suceuse n'est réellement avantageuse que pour le sable pur et dense ; les déblais, en effet, montent avec un volume d'eau considérable, et il faut que la séparation se fasse dans les puits de réception. Si le sable est vaseux, s'il est trop fin, il retourne à la mer avec l'eau débordante, le rendement de la drague diminue et peut arriver à être inférieur à celui de tout autre système.

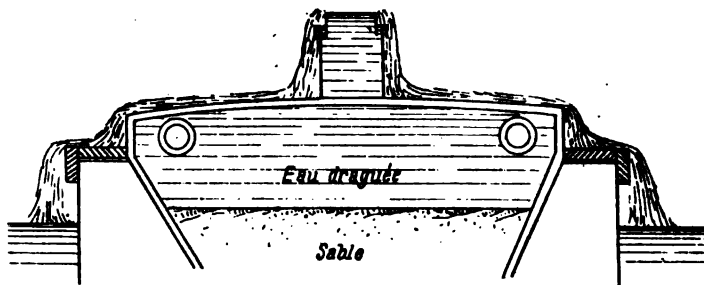


Fig. 137 *bis*. — Perfectionnement du *Brancker*.

M. A. G. Lyster a ajouté au *Brancker* un perfectionnement très important, pour lui permettre de pomper avec avantage même la vase (fig. 137 *bis*). Le bassin de réception des déblais est couvert avec de la tôle mince, sauf sur une largeur de 1,20 *m* au centre. Cette ouverture est surmontée d'une caisse de 1,50 *m* de hauteur en tôle, formant puits

et bordée le long de ses arêtes supérieures d'une hiloire qui assure un écoulement régulier de l'eau quelle que soit l'allure du bateau.

Les tuyaux d'adduction des déblais débouchent dans le puits aussi près que possible des côtés extérieurs, leur ouverture est ménagée pour produire un écoulement tranquille. L'eau de dragage, qui s'élève dans la caisse supérieure avec une vitesse réduite, a le temps de déposer le sable et la vase. En fait, cette drague économise comme temps de chargement de 20 à 25 0/0 sur le *G. B. Crow*, qui auparavant donnait le même rendement.

Avec de bons matériaux, on a pu exécuter grâce aux pompes suceuses des travaux qui n'eussent pas été possibles sans ce système; l'entretien des ports de la Manche et de la mer du Nord, de l'Adour, de Natal, dans les conditions actuelles, leur est dû. Demain des machines plus puissantes — déjà celles du Mississipi et du Volga — donneront des résultats encore plus considérables et résoudront de nombreux problèmes de l'hydraulique maritime.

Mais, et cette réflexion s'applique aux dragages en général, quelque réduit que soit le prix auquel on est arrivé à les exécuter, il n'en reste pas moins que l'enlèvement des cubes considérables auxquels on a généralement affaire exige de notables dépenses annuelles. Il ne faut donc baser l'amélioration ou la création d'un port sur l'emploi des dragues qu'avec la certitude d'avoir toujours les crédits nécessaires. Qu'une année seulement on ne puisse draguer devant Dunkerque et les navires qui le fréquentent aujourd'hui n'y entreraient plus. Dans les pays neufs surtout, la prudence sera de règle avant d'entrer dans la voie des dragages autres que ceux d'entretien courant.

Les grands travaux nécessitant les gigantesques engins comme le *Brancker*, le *Béta*, le *Volga*, sont rares et les ingénieurs qui en seraient chargés trouveraient dans leur expérience personnelle les raisons déterminantes de leur adoption. En général on peut dire pourtant que ces énormes machines ne sont pas assez avantageuses pour assurer leur préférence.

DÉROCHEMENT

Les roches assez tendres peuvent être attaquées directement par la drague, comme au seuil de Soubise sur la Charente. Sur la Severn, une couche de 1,50 *m* d'épaisseur a de même été extraite sur un banc de

800 mètres de longueur. Ce procédé a également été employé au canal de Manchester, à la Tyne, et par nous sur une grande échelle pour des madrépores.

Mais même ceux-ci étaient parfois trop durs, quand ils étaient injectés de sels ferrugineux. Pour les roches compactes, il faut recourir à la mine.

MINES SOUS-MARINES

Le procédé le plus simple consiste à faire poser l'explosif sur la roche, autant que possible dans les anfractuosités, par le scaphandre ou par de simples plongeurs. On obtient ainsi d'assez bons résultats, si la hauteur d'eau au-dessus de la roche atteint 4 ou 5 mètres; la charge de liquide fait l'office du bourrage des mines ordinaires. L'effet produit est plus ou moins proportionnel à la quantité d'explosif. C'est ainsi qu'ont été dérasés avec la poudre ordinaire la roche *Sans Nom* à Alger, les bajoyers d'une écluse à Cherbourg, etc.

Ces mines ne donnent pas, à beaucoup près, les résultats obtenus avec des forages. On ne s'en sert que si l'excédent d'explosif nécessaire est compensé par l'économie de main-d'œuvre.

Nous avons employé les mines superficielles pour briser des bancs épais de basalte et de madrépores. Voici comment, après de longues tentatives, nous opérions :

Le front d'attaque était fixé à 40 mètres de longueur; le talus, à 4 ou 5 mètres sous l'eau, avait 3 mètres d'épaisseur. Quand la drague avait extrait les produits d'une mine antérieure, les plongeurs en disposaient une nouvelle.

La mine était constituée par un chapelet. Une ficelle de 40 mètres de longueur portait de 2 mètres en 2 mètres des paquets de cartouches de dynamite, dont le poids variait suivant les besoins mais ne dépassait guère 10 kilogrammes. Entre ces paquets, de 25 en 25 *cm*, on attachait une cartouche de dynamite de 80 grammes. Les plongeurs disposaient le chapelet au bas du talus, en profitant de leur mieux des anfractuosités.

Il suffisait de mettre le feu à l'un des paquets pour que l'explosion eût lieu simultanément, d'un bout à l'autre du chapelet, propagée par les cartouches intermédiaires. La simultanéité donnait un rendement de plus de 25 0/0 supérieur à celui de mines isolées de même poids.

Le feu se mettait d'abord au moyen d'amorces et d'exploseurs électriques ; mais ils étaient très sensibles à l'humidité. On a employé

alors un autre procédé, plus prompt et plus sûr. Vers le milieu de la longueur du chapelet on attachait à l'un des paquets d'explosif une ficelle dont l'autre extrémité était retenue à la surface de l'eau par un flotteur. Pour déterminer l'inflammation, le flotteur était détaché et au moyen d'un anneau on faisait glisser le long de la ficelle tendue un paquet d'un kilogramme de cartouches, dont deux ou trois portaient une longueur d'un mètre de mèches Bickford imperméables allumées. On avait le temps de faire arriver l'amorce sur le chapelet et de se retirer. Le même procédé a été employé, avec des charges considérables, pour faire disparaître des roches sous-marines isolées.

Choix de l'explosif. — La poudre ordinaire ne s'emploie plus guère; sa puissance est faible et elle est trop sensible à l'humidité; cependant elle pourrait être utilisée dans des cas pressés. La dynamite n'exige que des trous de mine très réduits ; elle supporte facilement l'eau une demi-heure, ce qui permet la suppression de tout récipient et l'installation de mines simultanées. On a avantage à se servir de la dynamite la plus chargée (n° 1) et mieux encore de la dynamite gomme. Celle-ci se conserve longtemps sous l'eau ; mais il faut lui mélanger quelques cartouches de dynamite ordinaire pour assurer l'explosion.

Il existe encore une foule d'explosifs nouveaux, mais aucun ne paraît réellement supérieur à la dynamite.

Il est difficile de donner des prix pour le déroctement à la mine, opération très variable selon les circonstances. En général, les grandes mines sont moins coûteuses et nous comptions pour le basalte un kilogramme de dynamite n° 1 pour 4 mètres cubes. A Flood Rock, il fallait par mètre cube de déblais 11,14 *f* d'explosif pour l'excavation et 4,22 *f* pour l'élargissement des galeries. On employait le rack-a-rock, composé de 79 parties de chlorate de potassium et 21 parties de nitro-benzol.

Forage des trous de mine. — Lorsque c'est possible, il y a avantage à forer des trous de mines ; on peut employer à cet effet les perforatrices mécaniques comme celles de Ferroux, Brandt, Ingersoll, Rand, Dubois, etc., mues par l'air comprimé. Suivant les circonstances, la machine motrice et le compresseur sont installés à bord d'un chaland ou à terre. Dans ce dernier cas, l'air comprimé est envoyé par des tuyaux à joints flexibles ; mais la distance ne peut pas être trop grande, à cause du *laminage* de l'air comprimé.

Perforatrices rotatives (fig. 138). — Pour des profondeurs qui ne dépassaient pas 2 mètres d'eau avant le travail, nous avons employé, avant toute autre application, la perforatrice rotative. C'était une grande machine à percer analogue à celle des ateliers de machines. La tige porte inférieurement un foret hélicoïdal de 1,50 *m* de longueur. Le mouvement est donné par un volant ou par une poulie, si l'on dispose d'un petit moteur. Une vis fait pénétrer le foret à chaque tour de la hauteur voulue, suivant la dureté de la pierre. On obtenait ainsi un trou de 1 mètre de longueur et de 25 millimètres de diamètre, en deux ou trois minutes, dans du madrépore très dur.

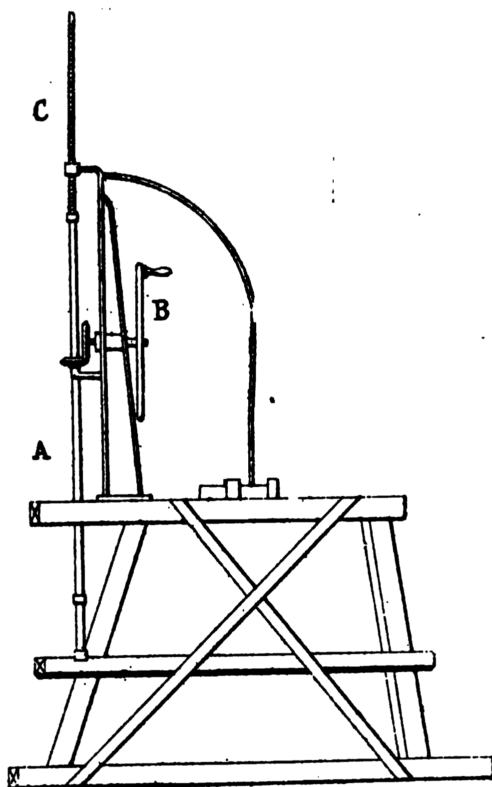


Fig. 138. — Perforatrice rotative.

Le curage était effectué par un jet d'eau sous pression ; le trou était ensuite bouché par une tige de bois de même diamètre, dont l'extrémité dépassait l'eau. Pour charger, à la fin de la journée, on faisait glisser jusqu'au sol le long de cette tige un tuyau en fer-blanc, on la retirait et les cartouches étaient descendues à l'intérieur du tuyau jusqu'au fond du trou, refoulées par la tige elle-même. La cartouche supérieure, qui portait une capsule avec un fil électrique était poussée par une tige, canaliculée dans toute sa longueur pour le logement du fil ; il était inutile de bourrer, la charge d'eau suffisait.

Le feu était mis chaque soir à trente mines de 1 mètre à 1,50 *m* de profondeur, creusées par trois hommes, dans une journée de dix heures, sans nécessité d'entrer dans l'eau.

La perforatrice était portée sur un échafaudage rigide en bois, déplacé par un treuil fixé à terre.

Aujourd'hui, la perforatrice rotative est devenue un instrument très usité et dont les modèles les plus connus sont ceux de Bornet et de Brandt. Celle de Topham a été employée pour creuser, à sec d'ailleurs, dans le calcaire les seuils du canal de Corinthe. Elle fouillait en neuf à dix heures des trous de 60 mètres de profondeur et de 95 millimètres de diamètre, qui étaient minés en quatre tronçons. On remplissait de sable les 45 mètres inférieurs, et l'on faisait sauter les 15 mètres restants; puis on vidait encore et faisait sauter 15 mètres, et ainsi de suite. Plusieurs trous étaient de cette façon minés en gradins (fig. 139).

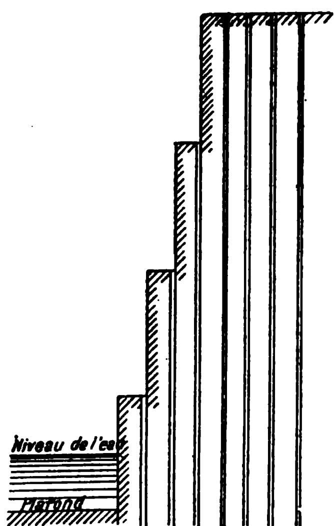


Fig. 139.—Mines au canal de Corinthe.

Oswego. — Les Américains au port d'Oswego (lac Ontario) ont appliqué le système suivant : Un chaland de 25 mètres de longueur sur 8 mètres de largeur, 2 mètres de hauteur et calant 75 *cm*, reçoit le long de l'un des côtés une voie ferrée de 2 mètres d'écartement, dont les trucs portent deux charpentes semblables à celle d'une sonnette. Sur chacune est installée une perforatrice Ingersoll, reliée au piston d'un cylindre où peut agir l'eau sous pression. Cette précaution est prise pour relever la perforatrice dans le cas où le fleuret se trouverait engagé dans le trou.

Le chaland étant ancré à l'endroit voulu par quatre béquilles de 40 *cm* de côté, une des perforatrices est placée à l'extrémité de la voie ferrée, l'autre au milieu; après l'excavation de chaque trou, on les déplace de 1,50 *m* pour recommencer.

Pour forer, on enfonce dans le sable ou le gravier qui recouvre le fond un tuyau qui sert de guide-manchon et qui dépasse la surface de l'eau d'un mètre; à 50 *cm* au-dessus de son extrémité inférieure ce tuyau est percé d'un trou en forme de double T pour la sortie des fragments de la roche.

On fait agir alors le fleuret d'acier qui a 8 mètres de longueur partagés en trois parties :

La partie supérieure, ronde,	a 4,25 *m* de longueur et	3,0 centimètres de diamètre
» moyenne, »	a 3,00 »	4,5 »
» inférieure, octogonale,	a 0,75 »	

Celle-ci porte une pointe de diamant de 8 centimètres, trempée dans une solution de parties égales de sel ammoniac, sel marin et alun.

Les trous sont creusés à 1,60 *m* en une demi-heure au moins et trois heures au plus, en moyenne une heure.

Le trou, à peine creusé, est nettoyé par l'eau sous pression; il y est descendu par le tuyau-guide une charge de dynamite variant de 1 à 3 kilogrammes, et l'on y met le feu.

Perforatrice Beaumont. — Sur la Tees et plus tard sur la Clyde, on a employé une perforatrice qui n'est qu'une modification de celle de Leschot. Un ponton de 18 mètres de longueur sur 11 mètres de largeur peut être fixé au moyen de jambes. Sur son périmètre, sont installés 24 forets animés d'un mouvement de rotation par une machine à vapeur. Ces forets se composent d'une tige creuse en acier à l'extrémité de laquelle sont sertis huit diamants qui usent le trou sur un diamètre de 6 *cm*. Les déblais étaient enlevés par une injection d'eau dans le tuyau. Le foret, dans des grès argileux assez tendres, ne descendait que de 8 à 10 *cm* par minute, par un mouvement de vis. Les trous étaient chargés de 350 à 800 grammes de dynamite.

Mines de la rade de New-York. — La rivière de l'Est, à New-York, est ou plutôt était parsemée de plusieurs écueils, îlots recouverts seulement de quelques pieds d'eau à marée basse. Pour les faire disparaître, le général Newton a employé deux procédés, suivant qu'il s'agissait de petits ou de grands rochers.

Pour les petits, on a creusé des trous de mine au moyen de barres, suivant une disposition spéciale :

Un grand bateau plat, protégé contre les chocs par une forte ceinture en fer (fig. 140), porte en son milieu un puits de 9,50 *m* de diamètre. Quatre grues, placées sur le bateau, permettent de lever ou d'abaisser, à travers ce puits, un dôme hémisphérique métallique du même diamètre de 9,50 *m*. Le bord inférieur du dôme porte un collier de fer percé de trous dans lesquels passent des supports qui peuvent être calés à des hauteurs différentes, de manière à maintenir le collier bien horizontal quand le dôme est immergé.

Le dôme est muni, vers sa partie supérieure, d'ouvertures formant

manchons pour les barres à mines. Celles-ci sont donc ainsi exactement guidées ; de plus, le dôme est un obstacle au courant très violent en cet endroit et qui eût gêné les manœuvres.

Les barres, qui pèsent 350 kilogrammes, sont alternativement relevées et lâchées, au moyen de câbles passant sur des treuils. Elles perforent des trous de 15 *cm*, qui sont chargés à la dynamite par des plongeurs. On tire les mines à l'électricité, après avoir déplacé le chaland.

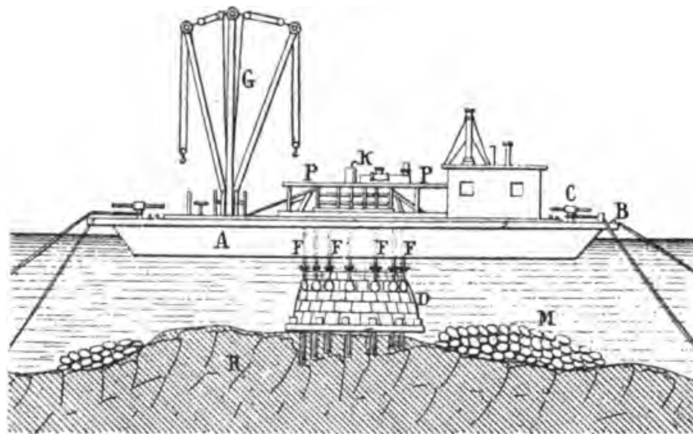


Fig. 140. — Petites mines à New-York.

C'est ainsi que pour les petits écueils, a été obtenue une profondeur de 8 mètres à marée basse.

Pour les grands ilots, Pot-Rock, Hallett's Point et Flood-Rock, le procédé est absolument différent.

Pour Pot-Rock, éloigné seulement de 200 mètres du rivage, on a creusé à partir de la terre une galerie horizontale, qui est allée rejoindre le rocher. Celui-ci a été alors percé de 41 galeries longitudinales et de 11 transversales, laissant entre elles de nombreux piliers dont 172 pour supporter le toit de l'excavation. Quatre mille quatre cent vingt-sept trous de mines, de 75 *mm* de diamètre, ont été percés aussi bien dans les piliers que dans les toits et chargés à la dynamite. Après avoir noyé le tout par de l'eau amenée au moyen d'un siphon, on a fait sauter les mines par l'électricité.

Pour Flood-Rock, plus éloigné de terre, on n'a pas songé à creuser une première galerie venant du rivage. Sur ce rocher, dont la superficie était de 4 hectares, a été établi un batardeau, qui a permis de forer

deux puits verticaux, ayant environ 3,60 *m* de côté et 22,50 *m* de profondeur, allant à 15 mètres au-dessous de l'étiage. De ces puits, et sur trois étages, partent des galeries à angle droit (fig. 141 et 142),

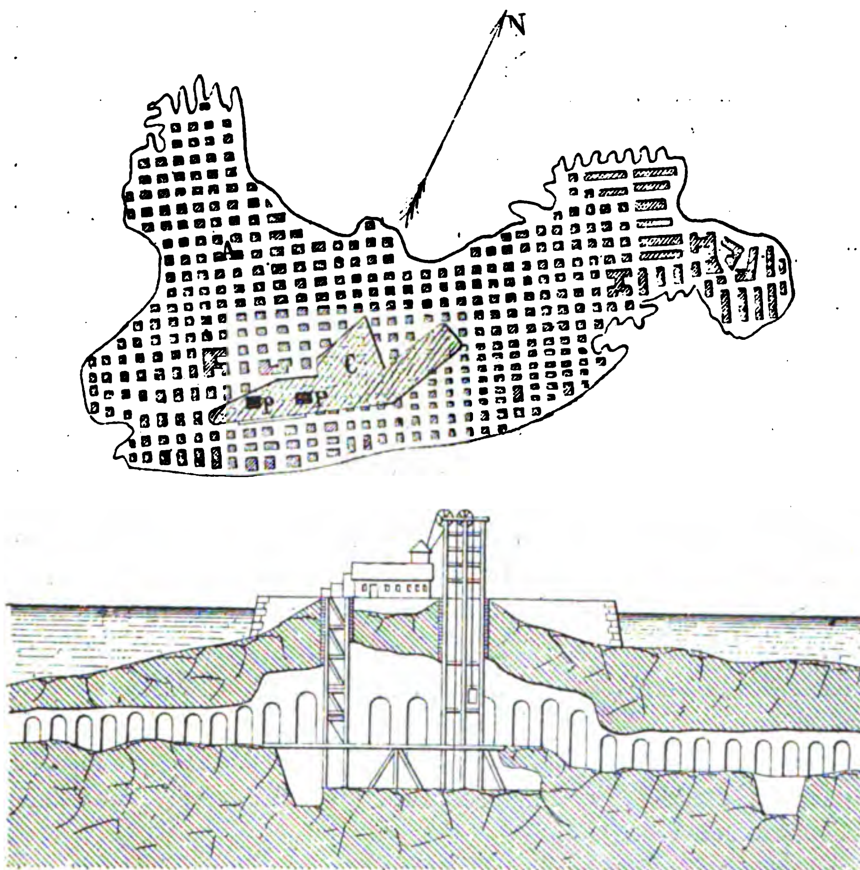


Fig. 141 et 142. — Mines de Flood Rock.

coupant le rocher comme un véritable damier. Dans les piliers et dans le toit, on perce des trous de mines au moyen de perforatrices à air comprimé.

Ces trous, au nombre de 13 286, ont été remplis de cartouches de rack-a-rock, formé d'un mélange de dinitrobenzole et de chlorate de potassium, explosif un peu plus puissant que la dynamite n° 1. Le chargement se terminait par une cartouche de dynamite dépassant le trou et munie d'une amorce détonante composée de fulminate de mercure.

L'explosion fut produite par le courant électrique de 60 piles; celles-ci n'étaient reliées qu'à un petit nombre de centres exploseurs, d'où l'inflammation se communiquait aux autres cartouches, par influence.

En tout, l'on employa 140 tonnes d'explosifs (104 de rack-a-rock et 36 de dynamite n° 1). L'explosion eut lieu le 10 octobre 1886 et a produit environ 170 000 mètres cubes de déblais. La mine entière a coûté 5 millions.

Mais comme à Pot-Rock et à Hallet's Point, on a eu encore à briser par la mine de nombreux débris de la première explosion, trop volumineux pour être dragués.

Installation sur chalands. — *Palerme.* — Un important dérochement a été exécuté dans le port de Palerme, pour enlever un banc de dureté variable, et le déraser à 7 mètres. Une partie du dérochement (46 500 mètres cubes) fut exécutée avec un appareil primitif, à raison de 28 francs le mètre cube. Un cube plus considérable a été extrait par des perforatrices à percussion portées sur un chaland ayant comme dimensions en mètres $10 \times 6 \times 2$, qui pouvait être soulevé hors de l'eau sur quatre béquilles; en l'affourchant alors sur quatre ancres, on obtenait une immobilité complète.

Il y avait deux de ces pontons, portant chacun 4 perforatrices, placées à des distances de 1,50 *m* sur l'un des côtés du chaland; elles creusaient des trous de 1,50 *m* en 45 minutes en moyenne. On écartait le bateau de 20 mètres pour procéder, une par une, aux explosions, et l'on recommençait à 1,50 *m* en arrière. Ces diverses opérations prenaient dix minutes.

Les cartouches de dynamite étaient enfermées dans des boites de fer blanc; l'explosion était déterminée par un appareil Bornhardt.

On a, dans ces travaux, étudié les conditions des explosions sous-marines. Les résultats auxquels est arrivé l'ingénieur M. Cimino concordant avec les nôtres, nous les exposerons en détail :

L'explosion d'une mine détermine deux zones : l'une dans laquelle les matériaux sont pulvérisés ; l'autre dans laquelle ils sont réduits en fragments dont le volume est en rapport avec la distance du centre de la mine. Ces zones sont limitées par deux sphères concentriques. L'intersection de ces sphères avec la surface forme un entonnoir, qui est un cône de révolution dont la hauteur est égale au rayon du cercle

de base. Au sommet, situé inférieurement, il se produit en outre une cavité sphérique.

La ligne de moindre résistance est la hauteur m du cône, dont le volume V brisé est

$$V = \frac{\pi m^3}{3}$$

Ce volume V est proportionnel au cube de la ligne de moindre résistance m, et aussi, d'après la pratique, à la charge C de dynamite.

m étant compté en mètres et C en kilogrammes, pour une autre mine on aura donc

$$\frac{c}{c_1} = \frac{m^3}{m_1^3} \text{ d'où } c_1 = \frac{c}{m^3} m_1^3$$

On peut déterminer par l'expérience le coefficient $\frac{c}{m^3}$ par deux opérations :

1° En maintenant la charge constante et faisant varier la profondeur de la mine ;

2° Au contraire, en maintenant la profondeur constante et variant la charge. Dans les deux cas on cherche à obtenir l'effet maximum.

Dans le premier, on a trouvé pour m une valeur maxima, au delà de laquelle la sphère de brisure n'arrive pas à la surface.

Dans le second, une valeur minima de c.

Et l'on a déterminé ainsi

$\frac{c}{m^3} = 0{,}65$ pour la roche la plus dure.
$= 0{,}38$ » » de dureté moyenne.
$= 0{,}28$ » » la plus tendre.

L'écartement le plus favorable des trous de mines est égal à leur profondeur ; un calcul très simple montre qu'alors si l'on détermine des explosions simultanées, les coefficients précédents se réduisent à

0,40 0,24 0,17

L'expérience indique aussi que la profondeur de 1,50 m ne doit pas être dépassée par les trous de mine ; les charges sont alors :

$(C = 0{,}40 \times \overline{1{,}50}^3 \ldots$, etc.).

C = 1,350 kg pour la roche dure
0,810 kg » » de dureté moyenne
0,573 kg » » tendre.

A Palerme, pour ne pas changer, on avait adopté une moyenne de

800 grammes par trou. On obtenait ainsi une dislocation suffisante, sans risque pour les ouvriers et sans secousses pour le voisinage.

Il arrivait souvent que l'explosion d'une mine déterminait celle d'une ou deux autres, par influence; parfois aussi quelques cartouches de dynamite, dont le détonateur a été dérangé, ne partent pas, ce qui exige des précautions dans le dragage ultérieur.

Dérocheuse. — La dérocheuse ou machine à briser le roc sous l'eau sans explosif est due à M. Lobnitz. Celle fournie à la Compagnie de Suez comporte un navire de 55 mètres de longueur, 12,20 *m* de largeur et 3,66 *m* de profondeur, calant 2,75 *m*. Il porte un beffroi auquel sont suspendues six barres d'acier, pesant chacune 4 tonnes, longues de 11,60 *m*, qu'on élève et laisse tomber d'une hauteur variable de

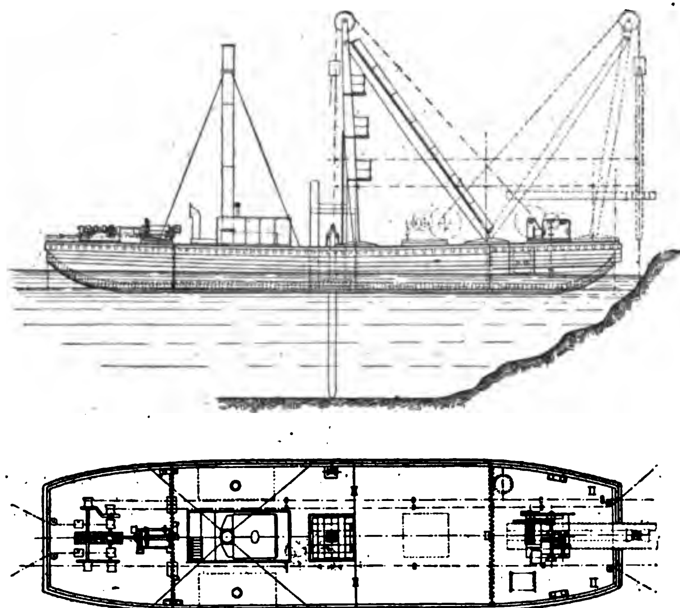


Fig. 143. — Dérocheuse de Lobnitz.

1,50 *m* à 6 mètres, par l'eau sous pression. Les barres perforatrices travaillent de chaque côté d'une élinde de chaîne dragueuse, dont les godets enlèvent les déblais brisés. On peut frapper de 200 à 300 coups par minute avec la série de cinq barres d'un côté (fig. 143).

Le papillonnage se fait autour d'une béquille.

On n'a que les renseignements les plus contradictoires sur les résultats obtenus à Suez.

La dérocheuse a été employée au bassin de radoub Hamilton, à Malte, pour enlever un banc de grès calcaire dur jusqu'à la profondeur de 10,80 *m* sous l'eau, dans un endroit où les explosifs auraient pu endommager les murs voisins. Le volume extrait a été de 5735 mètres cubes et les frais de dérochement ont été de 4,20 *f* par mètre. En y joignant la part proportionnelle du prix d'achat, déduction faite du quart représentant la valeur du matériel après le travail, on arrive à un prix total de 10,70 *f* le mètre cube.

Sur l'Hudson, M. Sandon Ross a employé en 1893 un appareil à peu près semblable à celui de M. Lobnitz. Les ciseaux pesaient 6 tonnes et tombaient de 4,50 *m* à 7,50 *m*. Avec une quinzaine de coups la pénétration était de 1,20 *m*. En cinq semaines, on a approfondi de 1 mètre une superficie de 2 000 mètres carrés, représentant l'extraction de 325 tonnes par journée de 10 heures de travail; le prix par tonne était, dit-on, de 75 centimes, chiffre qui nous paraît bien réduit.

Dérochement à la Pallice. — Pour dérocher à la cote — 5 mètres l'avant-port de la Pallice, l'entrée a été fermée complètement, entre le musoir du môle nord et le douzième bloc du môle sud, au moyen de quatre blocs construits comme on le verra au chapitre spécial de la construction des môles, et réunis par une maçonnerie étanche. Un batardeau édifié sur ces musoirs a complètement isolé l'avant-port de la mer; il fut vidé à marée basse par deux aqueducs munis de vannes; l'eau qui restait étant complètement épuisée, le dérochement a été opéré à sec.

En dehors du batardeau y avait 10 000 mètres cubes de dérochement à exécuter sous l'eau. Les mines ont été forées par des perforatrices Beaumont rotatives à diamant, animées d'une vitesse de 300 tours à la minute. Les trous étaient descendus à 20 *cm* au-dessous de la cote — 5 mètres qu'on voulait obtenir, et chargés de 2 kilogrammes de dynamite. Les déblais étaient extraits par une drague porteuse à godets.

ENTRETIEN DES PORTS PAR LE DRAGAGE

Dunkerque. — L'effet des chasses sur l'approfondissement du chenal devenant à peu près nul dans les dernières années où elles ont été employées, on se résolut en 1875 à draguer non seulement le chenal mais aussi le plateau extérieur, en pleine rade, pour obtenir une passe

de 100 mètres de largeur avec la profondeur — 2 mètres. On croyait arriver à ce résultat par l'enlèvement de 180 000 mètres cubes en deux années.

Les premières tentatives ne furent pas heureuses; il fallut recourir à l'emploi de dragues hollandaises qui avaient fait leurs preuves à Ijmuiden. De 1876 à 1881, un cube de 626 300 mètres cubes avait été enlevé hors des jetées sans amélioration bien sensible. En 1882, le réservoir des chasses étant supprimé pour l'exécution des nouveaux bassins, on commença à draguer dans le chenal, d'où furent retirés cette année 39 600 mètres cubes, en même temps que 389 800 mètres cubes en dehors des jetées.

En 1883, fut entrepris à l'ouest des jetées le creusement d'une fosse destinée à arrêter les sables poussés en quantité pendant les tempêtes, et qu'on déblaie durant la belle saison. A partir de ce moment, l'effet fut décisif. Voici les quantités enlevées pendant les années suivantes :

Années	Volumes enlevés en mètres cubes			
	Hors des jetées	Entre les jetées	Dans la fosse	Total
1883	196800	140000	180800	517100
1884	130000	89200	349600	568800
1885	45000	114000	324200	484100

Ces cubes sont loin de ceux qui avaient été prévus. Depuis 1885, le dragage annuel a été en moyenne de 500 000 mètres cubes, et grâce à cet enlèvement, on maintient en dehors des jetées une passe à la cote — 3 mètres ; la profondeur dans le chenal n'atteint que — 2 mètres. L'excédent en rade est nécessaire : un navire qui peut passer tout juste dans le chenal talonnerait en mer s'il n'y rencontrait pas au moins un mètre de plus de profondeur. Jusqu'à ces derniers temps d'ailleurs, le seuil du principal bassin n'était qu'à la cote — 1,50 *m*. Cet état de choses a changé depuis l'ouverture de l'écluse Trystram, dont le seuil est fondé à — 5 mètres.

Autres ports français. — Les dragages n'ont commencé à Calais qu'en juin 1881, mais le sable est plus pur qu'à Dunkerque; aussi dès le premier décembre de la même année avait-il été enlevé 139 000 mètres cubes et au bout d'un an 220 000 mètres. Le rendement supérieur des dragues était compensé par la difficulté du travail, à cause de l'agitation

de la mer, Calais ne se trouvant pas dans une rade protégée comme Dunkerque. Aujourd'hui il faut, pour entretenir dans le chenal et devant l'entrée une profondeur de — 4 mètres environ, enlever un cube annuel de 300 000 mètres.

Le dragage nécessaire chaque année monte à 200 000 mètres cubes pour Boulogne et 120 000 mètres cubes pour Dieppe ; ici, pour le galet c'est une drague à godets qui est employée.

A Boulogne, on a porté les fonds du port de marée de l'avant-port du chenal intérieur, à la cote — 4 mètres et la profondeur du chenal extérieur à la cote — 5 mètres. Celui-ci a été dragué par des suceuses, mais partout ailleurs les machines à godets ont été employées.

La Loire. — A son embouchure, à la hauteur des rochers dits les Charpentiers, la Loire est barrée par un haut fond de 2 000 mètres de largeur, dont la crête allait depuis un certain nombre d'années en s'exhaussant assez pour compromettre l'avenir de Saint-Nazaire. Malgré les apports considérables de la Loire, évalués à 400 000 mètres cubes à Nantes, l'analyse chimique et microscopique démontre que les sables qui composent cette barre proviennent pour la majeure partie non de la rivière mais de la mer. Ils sont poussés par les vents qui enfilent directement l'embouchure et dont la résultante générale, sans tenir compte des vitesses, représente un vent du SO soufflant pendant 42 jours, tandis que celle des vents « forts » souffle du Sud avec une durée relative du quart ; la résultante réelle est par suite un vent de SSO.

L'importance de cette constatation, que les sables de la barre sont d'origine marine, est considérable ; c'est elle qui a décidé en 1889 la tentative d'amélioration par le dragage. Jusque là on s'était heurté à l'idée de l'encombrement par les sables de la rivière qui, au contraire, sont emportés par les crues et les marées en pleine mer.

Après un dragage d'essai portant sur 150 000 mètres cubes de sable et qui avait abaissé la barre de 25 à 50 *cm*, abaissement maintenu pendant la mauvaise saison suivante, on a extrait en 1892 et 1893 un cube qui a élevé à 1 300 000 mètres environ la totalité des apports enlevés ; la profondeur sur la barre a été ainsi portée de 3,30 *m* à 5,50 *m* et plus, sur une largeur suffisante pour que, bien balisé et éclairé, le chenal donne passage à tous les navires. Depuis 1896, l'entretien est assuré par l'extraction annuelle de 150 000 mètres cubes environ.

Les dragages ont été opérés par des suceuses, qui ont eu à enlever

du sable de bonne qualité; aussi le rendement a-t-il été favorable. D'ailleurs les matières meubles et que peut retirer la drague aspirante ont toutes été extraites, le sous-sol est dur et maintenant si l'on désirait de plus grandes profondeurs, il faudrait recourir à d'autres procédés, à moins de perfectionnements dans les machines, sur lesquels on est toujours en droit de compter.

Ostende. — Les dragages d'amélioration ont eu lieu de 1880 à 1886; le sable a été extrait tant sur la passe extérieure que dans une fosse de garde creusée à l'ouest. L'enlèvement d'un cube de 1 200 000 mètres a suffi pour donner à la passe extérieure, suivant l'axe du chenal, une profondeur de 6,20 *m* sous le niveau des basses mers de vive eau ordinaires. Depuis 1886, les dragages ne font qu'entretenir la situation obtenue; leur importance est de 100 à 120 000 mètres cubes annuels, dont 40 000 dans le chenal, qui se maintient avec 4 à 5 mètres sous le niveau des basses mers. On sait qu'Ostende est particulièrement favorisé et que l'apport annuel y est faible. Il faut en outre enlever la vase de l'avant-port et des bassins de marée; la quantité annuelle en est de 65 à 90 000 mètres cubes. Ce dévasement est opéré par une drague à godets.

Les résultats favorables obtenus dans le chenal étaient rendus en partie inutiles par la difficulté d'accès de la rade elle-même. L'atterrage d'Ostende comprend deux rades: une extérieure offrant 10 à 12 mètres de profondeur et la petite rade, protégée par le Stroombank, long banc parallèle à la côte, large de 450 à 1000 mètres. Au commencement du siècle, le banc offrait à ses deux extrémités des passes plus profondes qu'aujourd'hui. On avait 6 mètres à l'ouest et de 7 à 8 mètres à l'est; alors la petite rade était parcourue par un volume d'eau considérable qui en maintenait les profondeurs. Mais peu à peu, tandis que les sondages diminuaient à l'ouest, jusqu'à près de 3 mètres, le banc s'étirait vers l'est, et allait se souder à la terre, ne laissant plus guère que 5 mètres d'eau à l'ancienne passe. Le courant s'est donc ralenti et il en est résulté un envasement dans la petite rade. Sur l'avis de de Mey, on a d'abord creusé à l'ouest une passe de 600 mètres de largeur; elle a atteint rapidement (1890-1891) une profondeur de 5 mètres qui sera portée et maintenue à 6 mètres. Ce dragage en pleine mer a été très facile et l'entretien de la passe n'obligera qu'à une extraction annuelle de 100 ou 150 000 mètres cubes au plus.

Depuis lors a été creusée à la profondeur de 5 mètres une passe médiane presque en face de l'entrée ; elle est à peu près la seule adoptée aujourd'hui par les navires. On se dispose encore à couper dans le banc

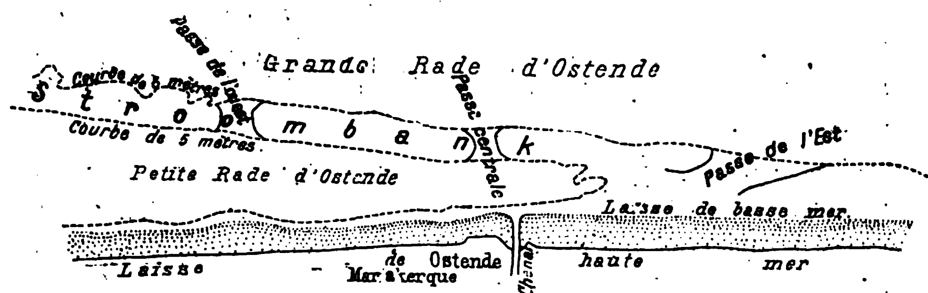


Fig. 144. — Nouvelles passes d'Ostende.

à l'est une passe qui interrompra la liaison entre la terre et le Stroombank; le courant primitif dont il a été parlé ci-dessus se rétablira selon toutes probabilités et assurera l'entretien des profondeurs de la petite rade (fig. 144).

Ces travaux si réussis sont dus à l'initiative de de Mey.

La Mersey. — L'histoire de l'amélioration de presque tous les ports par le dragage est la même : Méfiance à l'origine et succès définitif. L'ingénieur du Board de Liverpool lui aussi ne croyait pas à la possibilité de l'approfondissement de la barre de la Mersey par les dragues ; comme d'autre part, il n'avait aucune confiance non plus dans l'effet de l'endiguement par des môles, le Board résolut une expérience avec des pompes aspirantes installées à peu de frais sur des chalands ; au bout de 34 mois de travail on avait atteint une profondeur supplémentaire de 2 mètres que les tempêtes de l'hiver ne diminuèrent pas. C'est alors que furent construits successivement le *Brancker* et le *Crow*, entrés en service à partir de 1893. A la fin de 1896, on avait dragué 18 millions de tonnes, et depuis le dragage a été continué sur une vaste échelle. Le chenal qui n'avait que 3,30 *m* d'eau à basse mer en a maintenant plus de 8 sur 400 mètres de largeur et les navires entrent à tout état de la marée. Il semble même que la barre n'a plus de tendance à s'exhausser ; en tout cas, avec un entretien modéré, on conservera à Liverpool l'immense avantage qui est résulté de l'entreprise.

Port Natal. — L'entrée du port de Natal est comprise entre deux bancs de sable ; elle n'avait, suivant les époques, que de 60 *cm* à 2 mè-

tres de mouillage. On créa d'abord un avant-port au moyen de jetées convergentes dans lequel furent entrepris quelques dragages, qui donnaient une passe de 1,50 *m* à 4 mètres. Depuis 1896, a été employée une forte drague aspirante, qui maintient 5,50 *m* de profondeur en basse mer. Ces dragages ont été exécutés en pleine rade ouverte, dans une mer renommée pour sa violence et ils offrent à ce titre un intérêt exceptionnel.

New-York. — Le Main Ship Channel, d'après les divers relevés hydrographiques exécutés de 1752 à nos jours, avait une tendance à s'approfondir, et le mouillage s'y était accru d'un mètre ; on attribue cette amélioration à l'action des navires et des propulseurs d'une part, au rétrécissement de la passe par l'accroissement de la pointe de Sandy Hook, d'autre part.

Des sondages avaient fait croire que le fond était surtout composé de gravier, dont la stabilité relative autorisait l'espoir de la conservation des profondeurs après dragage ; les déblais ont consisté en un mélange de sable fin et d'argile qui formait une croûte dure. Les particules en étaient si tenues qu'elles se déposaient difficilement dans les chalands et retournaient en majeure partie à la mer, où elles étaient entraînées par les courants traversiers sur les autres bancs de la passe. En fait, dans un mesurage, on constata l'excavation de 135 000 mètres cubes quand on n'en avait payé que 98 000 mètres dans les chalands, volume qui ne représente guère que 78 000 mètres cubes en place à cause du foisonnement. Il y avait donc pour le gouvernement un bénéfice de 57 000 mètres cubes ou 42 °/₀.

On porte la profondeur du chenal, en ce moment, à 12,20 *m* sur une largeur de 600 mètres, par les mêmes procédés.

Mode d'opérer les dragages. — Dans les pays où n'existent pas d'entrepreneurs spéciaux, les dragages doivent être nécessairement exécutés par l'État ou la corporation qui les a à sa charge. Le prix d'acquisition du matériel majore alors souvent le prix du travail.

Là où l'on peut faire exécuter les déblais à l'entreprise, les opérations peu importantes doivent lui être confiées, pour éviter la même majoration. Mais s'il s'agit de déblais importants et surtout de l'entretien annuel, la question n'est pas aussi facile à résoudre.

L'entrepreneur est obligé de prévoir, pour établir un prix, toutes les circonstances défavorables qui peuvent se présenter, les chômages

pendant lesquels son personnel reste inoccupé, son bénéfice, etc. Il est obligé d'entretenir un atelier, des bureaux, d'avoir un représentant, s'il ne réside pas dans la localité. Il n'est pas certain de trouver un autre travail à l'expiration de son contrat et ses frais d'amortissement sont alors très lourds. L'Administration, en général, a ses ingénieurs et ses conducteurs qui peuvent donner une partie de leur temps à la surveillance du dragage. Elle dispose de locaux et d'ateliers organisés. En cas de chômage, elle peut utiliser son personnel à d'autres travaux; et elle est libre d'opérer comme il lui convient, selon le temps, les exigences du service, etc., facilités que n'a pas l'entrepreneur. En France les charges qui résultent de l'inscription maritime sont notables et le gouvernement n'a pas à s'en préoccuper.

En principe, l'administration pourra donc travailler à un prix très nettement inférieur. C'est ce qui a été démontré d'une irréfutable façon dans la plupart de nos ports du Nord, ainsi à Dunkerque, où le mètre cube en régie est revenu à 20 centimes, au lieu d'un franc dernier prix de l'entreprise.

Mais il faut, pour arriver à un pareil résultat, que le personnel dirigeant s'occupe du travail comme le ferait un particulier, qu'il y mette, par amour-propre et amour du service, autant d'âpreté qu'un tiers en apporterait en vue d'un gain personnel. Il faut donc des qualités, qu'on rencontre d'ailleurs souvent parmi les ingénieurs; et dans ce cas, il ne faut pas hésiter à leur confier les dragages en régie. Autrement, avec l'entreprise on a l'avantage de la certitude du prix de revient et des dépenses afférentes, à moins d'éventualités qui obligent à la résiliation des contrats.

Mesurage des déblais. — Le mesurage des déblais s'opère suivant profils ou dans les chalands. Pour l'application du premier système, les profils du fond sont levés avant et après l'opération. Cette opération demande la plus grande exactitude et au Danube on adoptait le dispositif suivant :

Deux chalands de 35 mètres de long et 4 mètres de large étaient couplés à 13,35 *m* de distance, par des poutres armées supportant une plateforme, portant de mètre en mètre 219 trous destinés au passage des tiges de sondages. Six rangées de rails formant voies parallèles de 2 mètres s'étendaient entre les lignes longitudinales de trous. Un chariot, qu'un transbordeur placé à une extrémité pouvait passer d'une voie à l'autre, portait deux règles divisées en décimètres, avec vernier

au centimètre. Ces règles étaient mues par des cordes attachées à leur extrémité inférieure et enroulées sur un treuil de manœuvre.

La position des chalands était facile à repérer de terre par l'alignement de deux montants verticaux. Quatre ancres maintenaient l'ensemble dans le courant.

Quand le bateau était bien fixé, le mesurage était effectué par le dispositif décrit.

Le mesurage dans les chalands est très commode : on n'a qu'à cuber le puits de réception. Ce système est exact pour le sable lourd et grenu, qui reste seul dans le puits. Il n'en est pas de même pour les vases qui retiennent une proportion plus ou moins considérable d'eau, proportion qui varie de 10 à 35 °/₀.

Cependant, c'est le seul procédé pratique, car les profils sont très variables dans la vase, et les cavités draguées tendent à se remplir par de nouveaux apports provenant des parties voisines. On devra donc effectuer avec le plus grand soin quelques mesurages préliminaires et fixer dans le cahier des charges la proportion à déduire. Le cahier des charges doit minutieusement prévoir toutes les difficultés possibles ; néanmoins il reste presque toujours quelque porte ouverte aux réclamations. C'est ce qui est arrivé, pour des cubes énormes, aux dragages de Buenos-Ayres.

Il faut par ailleurs noter que si les dragages s'opèrent au milieu de courants, ceux-ci emportent une partie de la vase ou des sables fins mis en mouvement par la drague, de sorte que le mesurage au chaland peut accuser un cube moindre que celui constaté par ces profils. C'est ce qu'on a constaté à l'approfondissement de la passe de New-York.

En revanche, à Grangemouth on a trouvé, à cause des apports nouveaux, qu'une excavation de 152 000 mètres cubes avait donné lieu au paiement de 495 000 mètres cubes mesurés dans le chaland. La proportion était donc triple ; pour les fouilles de l'Albert Dock sur la Tamise elle a atteint le quadruple. Dans les deux cas il s'agissait de vase.

A Dunkerque, la proportion des cubes mesurés au profil et dans les chalands a varié de 25 à 45 °/₀ suivant l'âge des dépôts.

En Angleterre les déblais se comptent plutôt à la tonne, en France au mètre cube. Cependant, depuis quelque temps la tonne a été prise comme unité dans les dragages de la Seine. Le poids est estimé par le tirant d'eau des chalands, en prenant la moyenne des profondeurs d'immersion à l'avant et à l'arrière.

CHAPITRE XVIII

OUVRAGES EXTÉRIEURS DES PORTS

MOLES ET DIGUES

Historique. — Les anciens, après avoir utilisé les ports naturels (Athènes, Syracuse) avaient également approprié des abris artificiels. Leur choix se portait sur les baies où ne débouchait aucune rivière à apports ; ils les circonscrivaient par des môles construits en béton tassé dans des moules en charpente et composés de cailloux et de mortier dosé à une partie de chaux et deux de pouzzolane.

Dans les mers agitées, ils jetaient des blocs artificiels fabriqués à terre. Vitruve et même Virgile donnent la description, d'ailleurs peu compréhensible, de leur procédé. Ils connaissaient bien le système des pierres perdues, qui fut appliqué au port de Trajan.

C'est pour *Cherbourg* qu'à la fin du XVIII[e] siècle fut conçue la première idée d'abriter une vaste superficie par un ouvrage artificiel. On n'avait aucun modèle et l'histoire de ce travail est celle des tâtonnements des ingénieurs. Divers procédés essayés ayant échoué, on eut recours aux enrochements versés par des chalands sur la ligne jalonnée de la digue.

Les matériaux provenant des carrières voisines étaient jetés pêle-mêle ; on laissait à la mer le soin de former les talus ; ils conservaient l'angle naturel $\frac{1}{1}$ au-dessous de la zone d'action des vagues, c'est-à-dire jusqu'à 6 ou 7 mètres au-dessous des basses eaux ; mais ils arrivèrent à $\frac{10}{1}$ au-dessus de ce niveau. Même avec cette inclinaison le massif était exposé à d'incessantes dégradations malgré un revêtement, du côté du large, de blocs naturels dont la dimension variait de un demi à un mètre cube. Ce fut une lutte constante et à plusieurs reprises les travaux durent être suspendus.

En 1807, à *Howth*, au nord et à l'extérieur de la baie de Dublin, un port

artificiel était entrepris, encadré par deux môles en enrochements qui, partant parallèlement du rivage, convergeaient ensuite l'un vers l'autre. De 1817 à 1836 furent construits encore dans le même système les môles de *Kingstown*, sur la rive méridionale de la même baie.

En 1829, les Américains établirent les deux digues de la *Delaware* avec une modification : les produits des carrières n'étaient plus jetés pêle-mêle; les petites pierres étaient employées à la base et dans l'intérieur du massif, tandis que le sommet et les talus étaient formés de blocs du poids de $\frac{1}{4}$ de tonne jusqu'à 7 tonnes, régulièrement rangés.

En 1832, à *Cherbourg* où les travaux étaient repris, on était conduit non seulement à protéger le talus du large par de gros blocs naturels, mais encore à exécuter en maçonnerie la superstructure au-dessus de la basse mer.

En 1834, Poirel inaugurait à *Alger* le cuirassement du talus extérieur des môles par des blocs artificiels, en béton ou en maçonnerie, jetés pêle-mêle et dont l'inclinaison se réglait à $\frac{1}{1}$. Le système était appliqué en 1841 à Cherbourg.

Les Anglais, cependant, continuaient l'emploi des enrochements au môle de *Portland* (1847-1871), où l'on eut seulement soin d'employer une notable proportion de pierres de 3 à 7 tonnes. Ils commencèrent en 1847 dans le même système le môle d'*Holyhead*, avec une superstructure, procédé appliqué aussi à la digue de Portland, aux môles d'Alderney (1847-1864) et de Table Bay au Cap de Bonne-Espérance (1860).

A *Marseille*, vers 1850, apparaissait un nouveau type composite, qui ne diffère de celui d'Alger que par la séparation des produits des carrières en catégories posées à part ou par couches de grosseurs croissantes. Ce type est devenu d'usage général dans la Méditerranée, avec des modifications dépendant souvent des conditions locales. Ainsi à Port-Saïd, à Alexandrie, les blocs artificiels constituent seuls ou en majeure partie la défense. En Italie, les blocs sont arrimés et non jetés pêle-mêle.

A *Douvres* (1857-1871), le môle a été exécuté avec parements presque verticaux, entièrement en maçonnerie; mais la dépense était telle qu'on n'a pas renouvelé l'expérience. A *Whitehaven* (1833-1841), le môle est formé de deux parements en maçonnerie avec remplissage en enrochements.

Les Anglais adoptaient les blocs artificiels à *Manora* (1869-1873), en les arrimant régulièrement par assises inclinées vers l'arrière ; le système a été suivi en plusieurs points de la mer des Indes et ailleurs.

A *Aberdeen* (1870-1873), des chalands coulaient en place d'immenses sacs de jute contenant du béton frais qui se solidifie sous l'eau en se modelant sur les blocs antérieurement posés. Les murs s'élèvent verticaux sans vides. Ainsi ont été construits les môles de Newhaven, New-Plymouth (Nouvelle-Zélande), Fraserburg, la Guayra, etc.

Des môles monolithes sont établis en coulant le béton en place *(in situ)* soit dans des caissons en bois *(Rosslare,* 1872, *Buckie*, 1877-1880), soit directement dans l'eau *(Aberdeen, Wicklow*, 1881-1884*)*.

On a enfin construit à terre des blocs vides qu'on échoue en place et remplit de béton *(Copenhague*, 1891-1894, *Heyst)*, et dans la Baltique les môles sont souvent une combinaison de charpente et d'enrochements.

PROJET DES OUVRAGES DE PROTECTION

La conception des ouvrages de protection d'un port dépend de nombreuses conditions dont l'étude préliminaire est indispensable. Elles ont déjà été énumérées.

L'exécution des ouvrages de défense varie suivant la nature des matériaux et les ressources qu'offre la localité. Ainsi à Port-Saïd les blocs des môles ont dû être fabriqués en simple mortier. Il faudra donc étudier les carrières voisines, s'il en est, tant au point de vue de leur richesse que de la facilité d'exploitation et du prix de revient. La nature et l'abondance du sable, de l'eau, des chaux et ciments, les moyens d'approvisionnement, l'espace disponible pour leur dépôt et leur manutention, la quantité et la qualité de la main-d'œuvre, l'existence d'ateliers mécaniques et d'ouvriers compétents, la nature du fond, la possibilité de créer un abri pour les embarcations de l'entreprise, une foule d'autres considérations encore suggérées par l'examen de la contrée, sont autant de facteurs à faire entrer en ligne de compte dans la détermination finale. Les études les plus minutieuses s'imposent donc et laissent encore parfois place à des surprises.

Des essais coûteux sont souvent nécessaires ; il est, par exemple, des couches de vase où les enrochements s'enfouissent à une grande profondeur, comme à Trieste. Le calcul du prix des môles d'après les

profils accusés par les sondages aurait amené de graves mécomptes financiers.

Sur les côtes à grands apports de sable, comme celles du Brésil, les observations doivent être multipliées, méthodiquement entreprises et classées. Pour un problème tel que celui du Rio Grande do Sul, par exemple, un projet erroné non seulement aboutirait à un insuccès, mais perdrait à tout jamais la possibilité de la création projetée. Tant qu'il reste des doutes dans les études préliminaires, l'abstention est de rigueur.

Il faut remarquer que les procédés d'exécution exercent une action réflexe sur le projet lui-même. On verra plus loin que le mode d'exploitation du port a également une influence décisive sur la conception de l'abri. Un établissement maritime est donc un ensemble complet, une machine dont toutes les parties doivent être étudiées simultanément. Les quelques lignes tracées pour indiquer le port futur décident de sa destinée ; leur étude ne saurait donc jamais être trop complète.

Nous avons maintenant à passer en revue les divers types d'ouvrages jusqu'ici exécutés. Aucun d'eux n'est intrinsèquement supérieur à un autre et ne peut être donné comme modèle. Ici, un enrochement très simple suffira ; là, les blocs les plus lourds auront peine à contenir la furie des vagues. C'est à l'expérience d'indiquer le système le plus convenable à la localité. Il n'est pas d'exemple de deux ouvrages identiques, bien que conçus par le même ingénieur. Ceux qui ont eu à étudier de nombreux projets de ports savent qu'il est impossible de proposer des solutions semblables, non seulement dans le tracé, mais encore dans les détails les plus simples d'exécution.

La science des travaux maritimes ne comporte pas de règle générale. Certes, on a comme guides les nombreux exemples adoptés dans les cas les plus analogues ; mais c'est l'étude des éléments locaux qui, seule, peut déterminer le choix.

FORME DES MOLES ET DIGUES

Eau profonde. — Quand une vague se propageant dans une eau profonde rencontre un obstacle, elle perd la force vive due à son mouvement orbitaire et éprouve une réaction égale au choc éprouvé par l'obstacle. Cette réaction se manifeste donc sous la forme d'une vague de même hauteur et dirigée en sens opposé.

On peut, pour se rendre compte de ce qui se passe, distinguer quatre cas (fig. 145). Deux d'entre eux produisent le même effet; c'est lorsque l'obstacle est rencontré par la lame à son niveau moyen, que ce soit sur sa face antérieure (1) ou postérieure (4). La vague de réaction M'N'O reprend la forme de la lame d'action MNO, qui ne change donc pas.

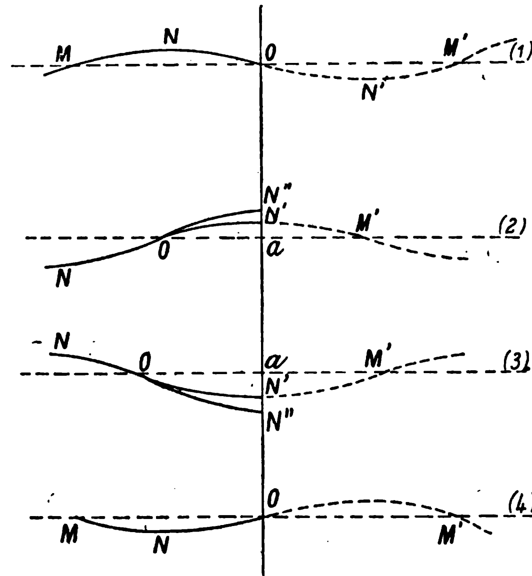


Fig. 145. — Effet d'un obstacle sur les vagues.

Dans les cas (2) et (3) la vague de réaction M'N' revient sur la portion N'O et il y a interférence. La lame monte (2) ou descend (3) en N", point tel que

$$a\,\mathrm{N}'' = 1{,}79\,a\,\mathrm{N}', \quad \text{d'après Weber,}$$

c'est-à-dire que la vague oscille le long de l'obstacle, en doublant presque de hauteur, mais sans se briser. L'effort contre la paroi est faible. Aussi la mer est-elle relativement tranquille le long des falaises accores.

La profondeur de l'eau s'entend relativement à la hauteur des vagues. Dans une localité abritée, où la lame est modérée, même avec une faible profondeur un mur vertical produit l'effet décrit; ainsi à Kilrush, situé dans une crique de l'estuaire du Shannon en Irlande, le môle n'a jamais subi d'avaries, malgré sa construction assez rudimentaire (fig. 146).

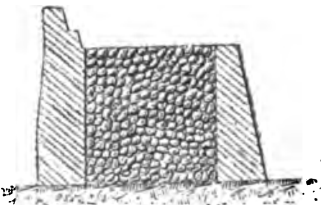


Fig. 146. — Kilrush.

Cet exemple a été invoqué plus tard en faveur de la construction d'un môle à parois verticales à Douvres; la différence d'exposition à la mer rendait la comparaison inadmissible.

Dans l'eau suffisamment profonde, un ouvrage à parement vertical, s'il est facile à construire, sera donc avantageux; il l'est aussi au point de vue économique, la quantité des matériaux qui le composent étant minima. Comme les diverses assises s'appuient mutuellement, il offrira des garanties de stabilité et l'entretien sera peu coûteux.

Mais le fond de la mer ne doit pas être meuble. Quand la vague, en effet, oscille le long de l'obstacle, elle détermine une force verticale affouillante. C'est pour cette raison qu'ont été minées les fondations de divers môles verticaux et qu'on a dû ou les descendre (Tynemouth) ou les protéger, soit par des enrochements (Odessa), soit par des blocs artificiels (Ijmuiden).

Rivage à faible pente. — La verticalité de l'obstacle n'a plus le même effet si la vague le frappe après propagation sur un fond où le mouvement d'oscillation s'est changé en mouvement de translation (voir page 84, Peterhead).

Le meilleure protection consiste évidemment alors à donner à l'ouvrage de défense l'inclinaison naturelle du rivage. Gerstner trouve même que le profil doit être convexe.

Il ne saurait être question d'adopter les plats talus des plages qui donneraient aux murs des dimensions inacceptables; on est obligé à des pentes plus rapides.

Emy a proposé comme profil d'un ouvrage de protection une courbe concave, contre laquelle la lame se déroule sans exercer d'effort considérable, la composante verticale étant prédominante. M. Stevenson a démontré ce dernier fait à Dunbar en fixant sur le parapet du mur, qui est courbe, à 7 mètres au-dessus du niveau de l'eau, deux dynamomètres, l'un vertical regardant le fond, l'autre horizontal dirigé vers la mer. Frappés par la lame ascendante, ils accusaient, le premier un effort de 15 500 kilogrammes par mètre carré, l'autre, seulement 137 kilogrammes, 84 fois moins; ce dernier résultat s'explique par le passage de l'onde tangentiellement à l'appareil. Les lames s'élevaient à sept fois leur hauteur le long du parement du môle.

D'après Emy, la forme de la courbe de la protection est presque indifférente, la meilleure étant pourtant la sinusoïde; l'important est

le raccordement de la base avec le fond de la mer, pour que la vague se déroule sans arrêt (fig. 147). Ce profil courbe a été appliqué aux

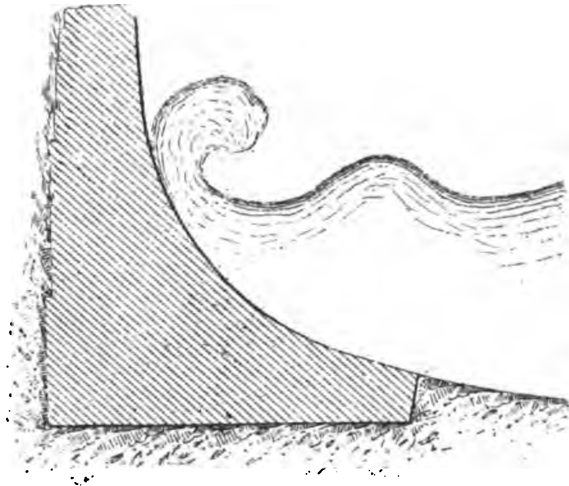


Fig. 147. — Profil proposé par Emy.

murs de protection de Saint-Martin dans l'île de Ré (fig. 148) et à la digue de Socoa (fig. 149). Mais ici dans des conditions défectueuses qui avaient pour résultat de projeter les lames à plus de 30 mètres de hauteur.

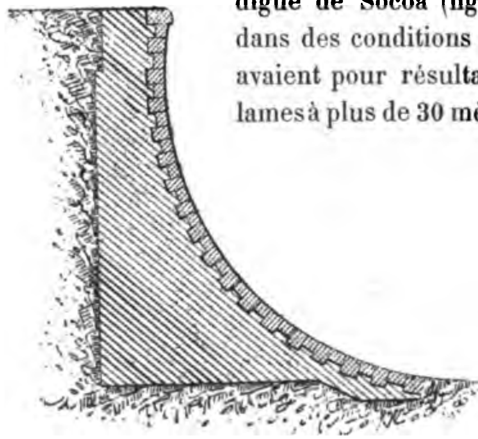


Fig. 148. — Protection de Saint-Martin.

En pareil cas, les vagues en retombant briseraient la partie effilée du mur, si l'on n'avait soin de l'empatter. Pour empêcher les paquets de mer de pénétrer dans le port, la partie supérieure du parement courbe reçoit une inclinaison vers le large comme avait été prévu le mur de Chiaja (fig. 150) à Naples, qu'on a du reste exécuté dans de mauvaises conditions (fig. 151). Cette inclinaison doit se raccorder

sans saillie avec le reste de la maçonnerie, car la présence d'un cordon

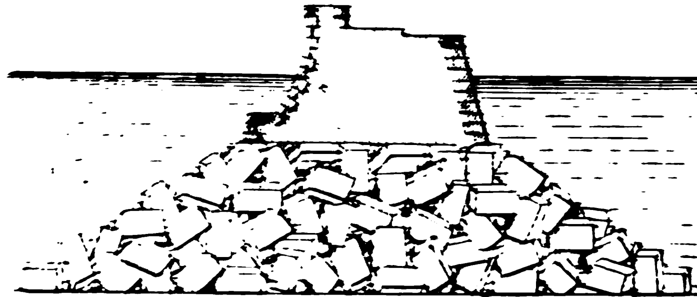


Fig. 149. — Digue de Seaton.

entraînerait des dégradations, ainsi qu'il est advenu à Stonehaven.

En fait, la sujétion des parements courbes les a fait abandonner et la construction des môles et digues s'exécute suivant des types très divers qui vont être examinés.

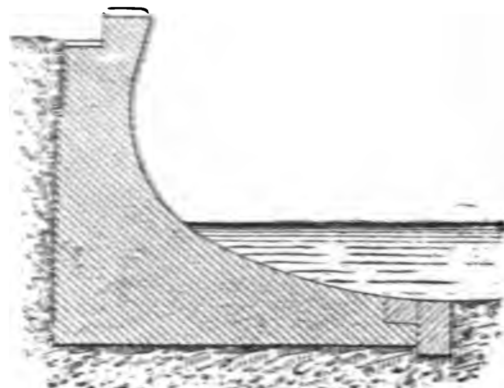


Fig. 150. — Profil prévu à Chiaja.

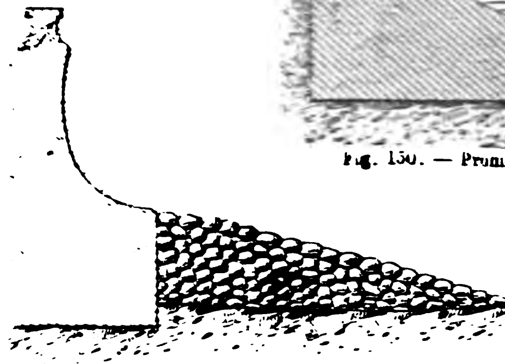


Fig. 151. — Profil exécuté à Chiaja.

ENROCHEMENTS

Action des vagues. — L'action des vagues n'est pas constante sur toute leur hauteur. Maxima près de la surface, elle diminue rapidement au-dessous et ne peut plus remuer les enrochements au delà d'une certaine profondeur, variable selon les expositions. Cette profondeur, qui détermine le *plan de repos*, est en général de 6 mètres en

Europe et ne dépasse guère 4 mètres sur les côtes des États-Unis ; elle a été trouvée de 12 mètres à la Guayra.

La vague projetée contre un obstacle s'affaiblit également en s'élevant, mais moins vite qu'au-dessous de son niveau. (Expérience de Stevenson à Dunbar, page 86).

Dans les mers à marée, la surface se déplace incessamment entre les niveaux extrêmes de l'amplitude ; le maximum se manifeste donc sur toute cette hauteur ; la zone d'action totale y est par conséquent plus étendue que dans les océans non sujets à la marée.

Les enrochements versés pour la construction d'un môle se disposent suivant leur talus naturel $\left(\frac{1}{1}\right)$; ils peuvent conserver cette inclinaison du côté du large au-dessous du plan de repos, mais au-dessus les vagues les étalent jusqu'à ce qu'ils aient acquis une stabilité suffisante pour résister. Au niveau du plan de repos, il se dessinera donc un angle ; quelquefois on constate trois inclinaisons différentes, produites par la variation de la force des lames suivant les profondeurs.

Le phénomène est le même dans les mers avec ou sans marée, sauf que le talus est plus allongé dans les premières.

L'inclinaison de ce talus dépend de la force des vagues qui frappent l'ouvrage. Elle atteint 11 et même $\frac{12}{1}$ dans l'Océan (Cherbourg, Holyhead), ne dépasse guère $\frac{8}{1}$ dans la Méditerranée (môle Saint-Louis et digue de Cette) et reste inférieure à $\frac{3}{1}$ sur les côtes des États-Unis.



Fig. 152. — Digue de Cherbourg.

I. — **Digue de Cherbourg** 1784-1851 (fig. 152). — Elle est établie dans les fonds de 12 mètres. Amplitude de la marée : 5,58 *m*. Longueur de la digue : 3 600 mètres. Fond de la mer : sable coquillier.

L'auteur du projet, de Cessart, avait imaginé de remplir de pierres des troncs de cône en charpente (diamètres 43,50 et 19,50 *m*, hauteur égale au petit diamètre). Ils devaient se toucher par le bas et les inter-

valles auraient été comblés d'enrochements. Le premier de ces cônes, construit à terre, fut mis à flot soutenu par une ceinture de barriques en juin 1784; on en coula dix-huit, de plus en plus espacés, mais les tarets et les tempêtes en eurent vite raison et à partir de 1788 on jeta simplement les pierres sur l'arête de la digue, en laissant à la mer le soin de les profiler. L'enrochement fut poussé avec activité; à la cessation des travaux, en 1790, il avait été déposé plus de deux millions et demi de mètres cubes.

Le talus était alors de $\frac{1}{1}$ vers le rivage et de $\frac{1\ 1/2}{1}$ vers la mer; mais l'action des vagues ne tarda pas à augmenter celui-ci à $\frac{10}{1}$ depuis le sommet jusqu'à 5 mètres au-dessous des basses mers. Plus bas, la pente ne changea pas. L'allongement de la base de la section, qui atteignit 100 mètres, avait eu pour conséquence naturelle la diminution de la hauteur.

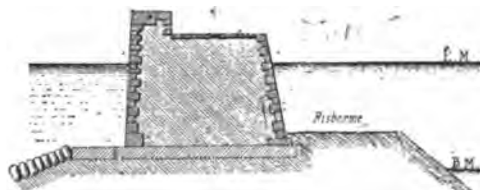


Fig. 153. — Superstructure de Cherbourg.

A la reprise des travaux en 1800, il fut constaté que les parties protégées par un revêtement de gros blocs avaient bien résisté, et il fut résolu de continuer avec de forts matériaux. On établit sur le milieu de la digue une batterie maçonnée ; mais à diverses reprises la mer emporta les travaux et noya même la garnison de la batterie (1808). Des tentatives insuffisantes pour remédier au mal n'amenèrent aucun résultat et jusqu'en 1830 ce grand travail sembla condamné par l'expérience.

On avait pourtant acquis la notion précise des points faibles dans la zone d'action des vagues, on avait vu aussi que certaines parties maçonnées avaient subi sans avaries le choc des tempêtes. Il était donc possible d'établir un programme sérieux de continuation : Recharger les enrochements étalés par la vague pour atteindre le niveau des basses mers ; protéger par de gros blocs le talus du large ; et, au-dessus du niveau précédent, établir une superstructure en maçonnerie. Après plusieurs expériences, le profil adopté fut le suivant :

L'enrochement fut arasé avec 30 mètres de largeur au niveau des basses mers ; la plateforme fut couverte d'une couche de béton de 80 *cm* d'épaisseur et de 15 mètres de largeur, commençant à 12 mètres de l'arête extérieure. Sur cette chape s'éleva un mur en maçonnerie de 11 mètres de largeur à la base, 9 mètres au couronnement et 8 mètres de hauteur, à parements de granite (fig. 153). Le talus du large était recouvert de gros blocs naturels.

Ces ouvrages éprouvaient naturellement des tassements irréguliers ; on ne commençait la superstructure qu'après la consolidation de l'enrochement et la maçonnerie s'exécutait par assises annuelles. Le pavage et le mur de garde n'étaient établis qu'au bout de plusieurs années.

Les musoirs ont reçu comme la partie centrale un fort de 35 mètres de rayon, à deux étages. Là, le talus du large est protégé par des blocs artificiels de 10 à 20 mètres cubes, le volume décroissant jusqu'à la limite de l'action des vagues ; au-dessous, le revêtement est composé de pierres de 150 kilogrammes. Au pied de la superstructure, des blocs de garde artificiels construits sur place appuient les matériaux des assises inférieures.

La digue ainsi achevée se maintient fort bien et ne donne lieu qu'à de minimes rechargements.

II. — La digue de Cherbourg a été décrite la première, parce qu'elle a été le premier sujet d'études complètes ; mais elle n'est pas le type le plus simple d'ouvrage en enrochements. Quand ceux-ci sont établis dans des baies abritées, ils ne comportent aucune protection du talus du large ; il est toujours bon cependant de le garnir des plus gros blocs naturels dont on dispose.

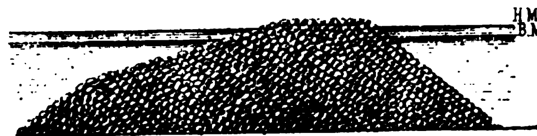


Fig. 154. — Digue de Portland.

Digue de Portland (1847-1871) (fig. 154). — Cette digue de 1750 mètres de longueur se trouve dans la baie que délimite la presqu'île de Portland, par des fonds de 13 à 18 mètres ; amplitude de la marée : 2 mètres. Fond de la mer : argile et vase. Les enrochements sont de toute grosseur, mais en grand nombre de 3 à 7 tonnes ; l'incli-

naison maxima est de $\frac{5}{1}$. Largeur de la base : 105 mètres. Les musoirs sont établis en maçonnerie fondée à la cote — 8 mètres. Le rechargement annuel, nécessité par la trituration des matériaux, a atteint jusqu'à 3 000 tonnes. Cependant la baie est relativement très abritée. Le quai intérieur est protégé par un mur vertical en maçonnerie.

Môle du canal Saint-Louis (fig. 155). — Récemment encore ont été construits d'après ce type les môles du canal Saint-Louis qui réunit le Rhône à la mer. Le débouché a lieu dans le golfe tranquille de Fos. Le môle nord, de 500 mètres de longueur, est protégé par celui du sud, qui en compte 1 700 ; comme ce dernier est le plus exposé, son talus du large est revêtu de blocs de 1 200 kilogrammes. L'inclinaison est de $\frac{2}{1}$.

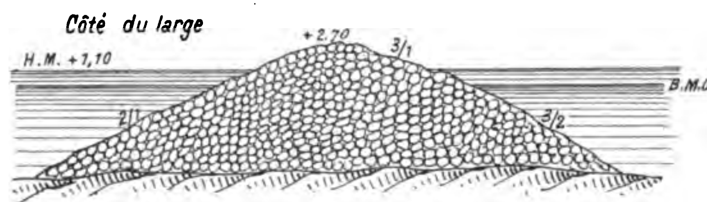


Fig. 155. — Môle du canal Saint-Louis.

C'est également dans ce système qu'ont été construits divers ports nouveaux de la Nouvelle-Zélande, tels que ceux de Westport et d'Otago.

III. — Quand l'ouvrage est établi dans des mers relativement calmes, mais où les vagues sont pourtant capables de remuer les enrochements ordinaires, on recouvre le talus extérieur de grosses pierres comme à Cherbourg, ou on le pave régulièrement.



Fig. 156. — Digue de Plymouth.

Plymouth (1812-1833) (fig. 156). — Profondeur de 12 à 14 mètres. Amplitude de la marée : 4,70 *m*. Longueur : 1 580 mètres. Fond de la mer : argile. Talus maximum du large $\frac{5}{1}$, pavé dans la zone d'action des vagues de blocs de granite de $1{,}20 \times 1 \times 0{,}80$ *m* noyés dans du ciment.

Ce dallage accélérant la retombée de la lame de retour, les parties inférieures étaient tellement remuées qu'on a dû récemment les perreyer. L'entretien annuel est considérable.

La construction de la digue de Plymouth a été aussi mouvementée que celle de Cherbourg. Par deux fois tout le talus extérieur a été complètement bouleversé ; une autre fois, deux cents mètres de longueur d'enrochements de la partie supérieure, sur trente mètres de largeur, ont été renversés.

En 1824, en une nuit, 200 000 tonnes de pierres ont été enlevées. Le mal provenait en grande partie de la forte proportion de vides dans l'ouvrage d'où ont été exclus les enrochements de petit volume.



Fig. 157. — Môle de Kingstown.

Kingstown (1817-1836) (fig. 157). — Les musoirs arrivent à la profondeur de 8 mètres. Profondeur moyenne : 6 mètres. Amplitude de la marée : 3,40 *m*. Longueur des deux môles : 2 880 mètres. Fond de la mer : roc et sable. Enrochements pêle-mêle de 250 kilogrammes à 10 tonnes. Talus du large pavé à sec de grosses pierres. Inclinaison maxima $\frac{5}{1}$. Rechargements insignifiants.



Fig. 158. — Digues de la Delaware.

Delaware (1829-1869) (fig. 158). — Les deux digues sont dans la baie ouverte de la Delaware, par des fonds de 9 à 10 mètres. Amplitude de la marée : 2 mètres. La base des digues a 53 mètres, leur hauteur 17 mètres. Les enrochements n'ont pas été versés pêle-mêle, le travail a été réglé comme suit :

Assises	Noyau de l'enrochement	Talus recouvert de pierres de
Du fond à la cote — 2m	Pierres de $\frac{1}{4}$ à 2 *t*, celles-ci formant les 3/4 de la masse.	2 à 3 *t*
Entre les cotes — 2 et 0	— de $\frac{1}{2}$ à 3 *t*, celles de $1\frac{1}{2}$ à $2\frac{1}{2}$ — —	3 *t*
Zone de la marée.	— de 4 à 5 *t* posées régulièrement.	4 à 7 *t* en boutisses

L'inclinaison du talus du large est de $\frac{3}{1}$.

Nouveaux types américains. — Les vagues n'étant pas fortes sur le littoral des États-Unis, l'inclinaison du talus du large dans la zone d'action des lames est moins prononcée qu'en Europe et les avaries aux môles en enrochements ne sont pas fréquentes. Il en résulte que ce système est encore presque le seul usité en Amérique. C'est ainsi qu'après avoir fermé la passe *(gap)* entre les deux anciens ouvrages de la Delaware, on construit en ce moment une nouvelle digue dans la baie à 4 kilomètres environ au nord des autres. Elle s'étend dans les profondeurs de 4 à 16 mètres sur une longueur de 2 kilomètres et demi et couvre une rade de 220 hectares avec une profondeur d'eau de 10 mètres et de 100 hectares en plus avec des fonds de 7,25 *m.*

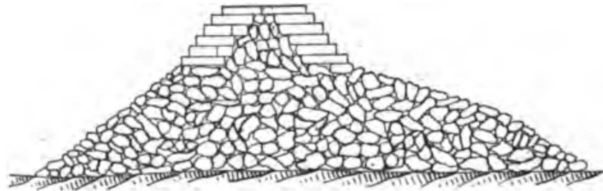


Fig. 159. — Fermeture entre les digues de la Delaware.

La figure 159 en donne le profil. La plateforme supérieure consiste en un escalier de grosses pierres très longues juxtaposées, avec leurs joints bien coincés.

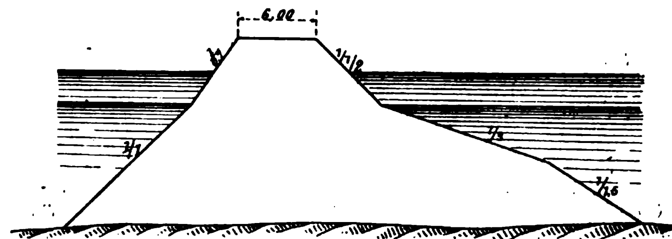


Fig. 160. — Môle de Sandy Bay.

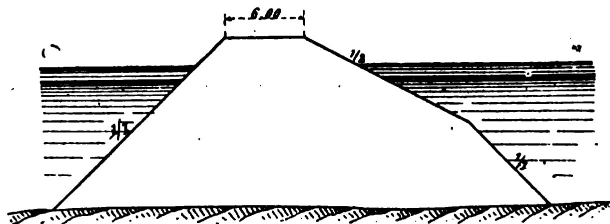


Fig. 161. — Môle de Point Judith.

Le même profil est adopté à San Pedro (Californie), à Sandy Bay

(Massachusetts) (fig. 160), à Point Judith (fig. 161) [1]. Les spécifications pour Sandy Bay portent que la partie comprise au-dessus du plan d'équilibre (limite inférieure de la zone d'action des vagues) est construite en blocs de 4 tonnes au moins et de 6 tonnes en moyenne.

Môles de la Baltique. — Dans la Baltique, où le taret n'existe pas, les jetées et les môles sont souvent établis d'après un système composite, comprenant un enrochement retenu au milieu de pieux en bois. Nous en donnons divers types :

Neufahrwasser.— L'embouchure actuelle de la Vistule à Neufahrwasser est endiguée par deux jetées ; la plus ancienne, celle de l'ouest est formée d'enrochements maintenus dans un coffrage de pieux jointifs ; sur ce substratum est établi un massif de maçonnerie.

L'autre jetée, démolie, a été reconstruite suivant le type figure 162. Du côté de la mer, sont disposées des fascines recouvertes de pierres, avec talus de $\frac{1}{3}$. Vers le chenal, le talus est maintenu par un coffrage en charpente, rempli également d'enrochements ; une ligne de pieux intérieurs empêche les navires de heurter contre le coffrage.

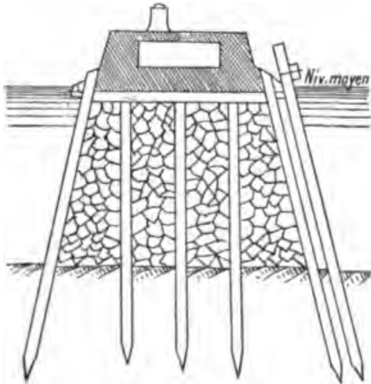
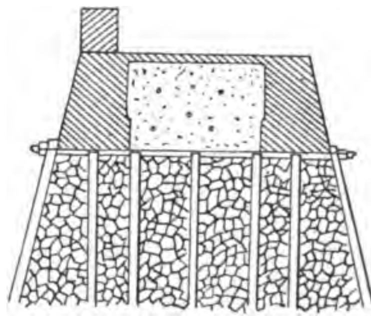


Fig. 162. — Môle de Neufahrwasser.


Fig. 163. — Môle nord de Pillau.

Pillau (fig. 163). — Les jetées de Pillau sont construites sur le type de la jetée ouest de Neufahrwasser, mais avec des tirants en fer pour consolider les pieux ; la superstructure se compose de murs parementés, reliés par des murettes transversales avec remplissage au béton maigre.

(1) Ces renseignements sont dus à l'obligeance de M. l'ingénieur Louis Schermerhorn.

Kiel (1886-1888) (fig. 164). — Les pierres et les briques étant rares près de Kiel, le môle a été construit de la façon suivante : Sur le fond vaseux, qui s'étend jusqu'à 25 mètres de profondeur, on a versé un

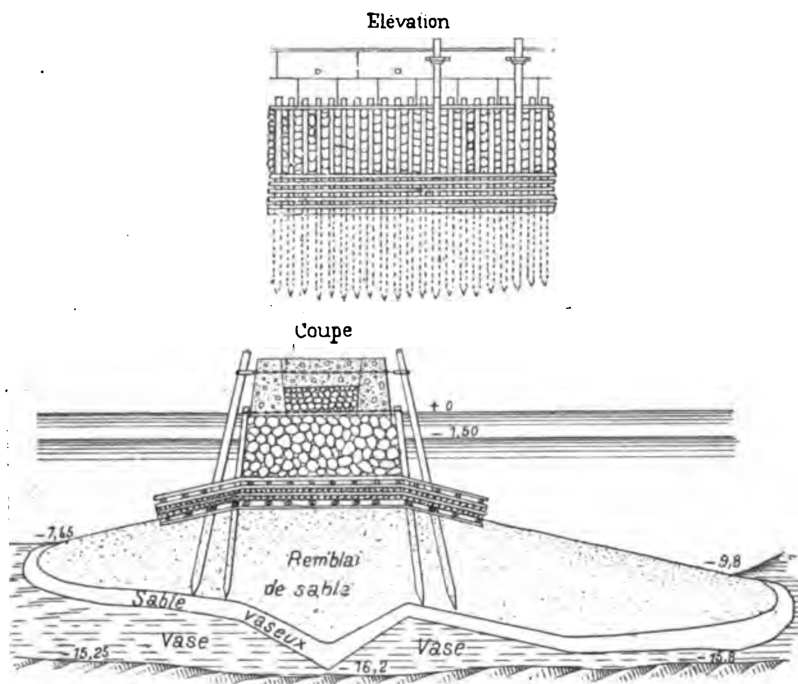


Fig. 164. — Kiel.

fort remblai de sable sur lequel est établi un épais fascinage. Au milieu d'un double pilotis un enrochement comme ceux des piers de New-York a été recouvert de béton de gravier. Les têtes des pieux sont réunies par des chaînes. Le béton commence au niveau ordinaire de la mer, où s'arrêtent les pilots dont la conservation est ainsi assurée.

IV. — ENROCHEMENTS AVEC SUPERSTRUCTURE

Dans le type de Cherbourg avec superstructure rentrent les môles suivants :

Holyhead (1849-1873) (fig. 165). — Longueur : 2 400 mètres. Fond de la mer : argile. Le môle arrive à la profondeur de 17 mètres. Amplitude de la marée : 6 mètres. Enrochements de toutes grosseurs jusqu'à 20 tonnes. Ils furent versés jusqu'au niveau des hautes mers, puis

au milieu l'emplacement de la fondation de la superstructure (fig. 166) a été excavé par une grue à la hauteur des basses eaux. Le talus du large a atteint l'inclinaison de $\frac{12}{1}$; aussi brise-t-il assez la lame pour que la



Fig. 165. — Môle d'Holyhead.

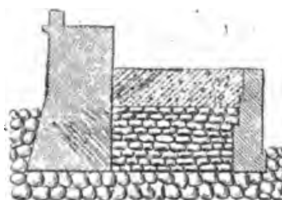


Fig. 166. — Superstructure d'Holyhead.

promenade qui couronne le mur de garde n'ait pas eu besoin d'être pavée.

Sur une courte distance avant le musoir, l'enrochement n'avait été élevé que jusqu'au niveau de la basse mer, dans la crainte qu'au-dessus les pierres ne fussent poussées dans l'entrée par la lame. A la fin de 1889 durant une tempête les vagues, mal brisées dans cette section, détruisirent le parapet à une hauteur de 6 mètres.

Le talus du large n'est pas pavé ; aussi nécessitait-il de fréquents rechargements ; les moellons près de l'extrémité ont été recouverts de festons de lourdes chaines pesant un millier de tonnes qui les retiennent assez bien.

Alderney (1847-1872) (fig. 167).— Un remarquable type de môle de ce genre est celui d'Alderney, établi dans une île très exposée, faisant face à l'Atlantique et qui s'avance jusque par les fonds de 40 mètres, profondeur sans exemple ailleurs. Amplitude de la marée : 5 mètres.

L'énorme volume d'eau attiré par la marée de Saint-Malo, qui atteint 13 mètres, détermine devant Alderney un ras de 7 à 8 nœuds. La position était donc périlleuse ; mais le gouvernement anglais désirait avoir en vue de Cherbourg un port militaire d'ou l'on pût surveiller les mou-

vements de nos flottes. Deux môles devaient le circonscrire ; il n'en a été construit qu'un, celui de l'ouest, d'une longueur de 1 430 mètres. Fond de la mer : roc et sable compact. Profondeur moyenne : 18 mètres.

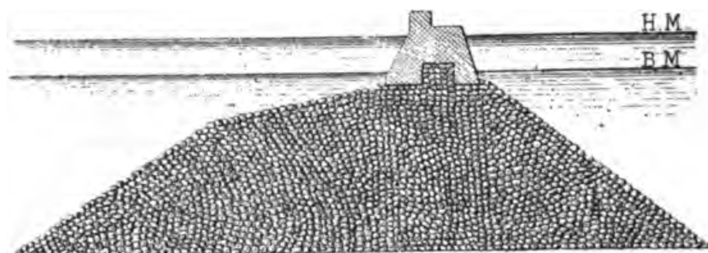


Fig. 167. — Môle d'Alderney.

Le soubassement s'arrêtait au niveau de la basse mer. Pour la superstructure, on adopta successivement quatre types, les premiers ayant été reconnus insuffisants :

1° Deux murs parallèles avec remblai de moellons ; le mur à la mer avec 4,25 m d'épaisseur et talus de $\frac{3}{4}$ construit en grosses pierres posées à sec ; fondations presque au niveau de la basse mer ;

2° Mur à la mer en maçonnerie de ciment, talus $\frac{1}{2}$ et la fondation abaissée à la cote — 2,75 m ;

3° A la base du mur extérieur, blocs de garde en béton protégés par des enrochements ; talus $\frac{1}{3}$, remblai en maçonnerie de ciment ; fondation à la cote — 3,50 m ;

4° Fondation à — 5 mètres et même — 7,25 m ; mur extérieur parementé en gros blocs de granite ; remblai en blocs de béton.

La hauteur énorme des enrochements produisait des tassements et par suite des fissures dans la superstructure. Les vagues, qui se développent dans toute leur amplitude en de telles profondeurs, s'élevaient en paquets de 60 mètres de hauteur et bouleversaient les talus aussi bien intérieur qu'extérieur. Il a fallu abandonner la moitié la plus avancée du môle.

Un môle semblable exécuté à *Sainte-Catherine*, Jersey, a très bien tenu, la côte y étant protégée par celle de France.

Dans le même système a été construit le môle de *Portland*.

ENROCHEMENTS AVEC LA FACE EXTERNE RECOUVERTE DE BLOCS

V. — **Alger** (1840-1876) (fig. 168).— Poirel ne trouvant pas à Alger de blocs naturels assez forts pour protéger le talus du môle, imagina d'en fabriquer d'artificiels en béton et en composa uniquement les

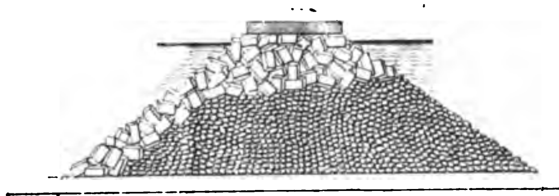


Fig. 168. — Alger.

premières portions de l'ouvrage. Cette dépense reconnue inutile, il forma le soubassement d'enrochements jusqu'à la cote — 4 mètres, et protégea par des blocs de 15 mètres cubes au minimum le talus extérieur et la partie supérieure.

Le musoir atteint la profondeur de 32 mètres; le talus est à $\frac{5}{4}$; aussi la base inférieure ne dépasse-t-elle pas 75 mètres; la base supérieure a 14 mètres.

Des blocs artificiels de garde de 130 mètres cubes ont été construits sur la plateforme.

Marseille (1844-1871) (fig. 169). — L'expérience d'Alger a été féconde; à partir de cette époque, on a pu presque à coup sûr déterminer

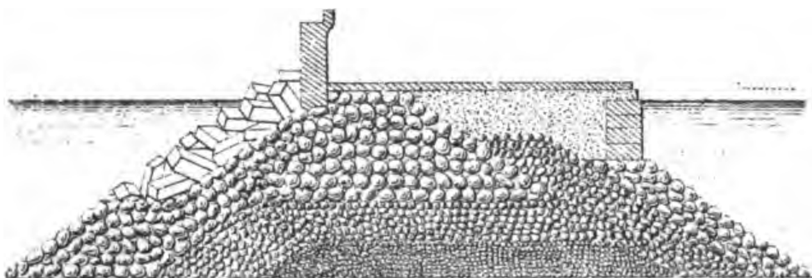


Fig. 169. — Marseille.

le profil des ouvrages capables de résister à la poussée des flots. Un type complet a été étudié par Pascal pour les nouveaux bassins de Marseille; nous le décrirons en détail, car il a été souvent imité.

Le système des enrochements s'y combine avec celui des blocs protecteurs. Pour obtenir l'économie maxima dans la construction du noyau, on a immergé les matériaux par catégories régulières, en utilisant tous les produits des carrières du Frioul. L'expérience avait indiqué que ces produits s'obtenaient dans les proportions suivantes sur 100 kilogrammes:

Nature des matériaux		Poids	Proportion
Pierrailles		jusqu'à 2 *kg*	15
Moellons		de 2 à 100	32
Blocs de	1re catégorie	100 à 1300	24
	2e catégorie	1300 à 1900	15
	3e catégorie	au-dessus	14
			100

Les pierrailles réservées pour le béton, chacune des autres sortes est employée à part, les plus gros matériaux enveloppant les plus petits; le cube de chaque couche est calculé dans les proportions ci-dessus. Les blocs dans chacune des assises étant uniformes, les vides sont plus considérables que dans un mélange où les petites pierres comblent les trous entre les grandes, et il en résulte une économie qui n'exclut pas la solidité.

On construit d'abord un noyau dont la base, à la cote + 2 mètres, est large de 5 mètres. Sur le talus extérieur, à la profondeur — 6 mètres, on laisse une risberme sur laquelle sont jetés des blocs artificiels de 10 mètres cubes, la face minima tournée vers le large. Ce revêtement est élevé jusqu'à la cote + 3 mètres, la partie qui supporte le niveau de l'eau s'inclinant en talus doux vers le mur d'abri.

Le mur, qui s'élève à la cote + 8,40 *m*, est bâti sur un massif de maçonnerie de $3{,}35 \times 2{,}10$ *m* arasé à 50 *cm* au-dessus du niveau de la mer. Le parement est vertical à l'extérieur, incliné de $\frac{1}{10}$ à l'intérieur. La base est protégée au large par une maçonnerie de 2,50 *m* de largeur sur 5 mètres de hauteur.

Ce noyau, la véritable défense, est élargi dans le port pour former un quai de 30 mètres au minimum. Le parement vertical, en blocs artificiels, varie de hauteur suivant la profondeur de l'eau; un simple calcul indique ce que doit être cette hauteur pour obtenir une économie sur le cube des enrochements.

Les vides entre les pierres étant du tiers, le mouvement des vagues se propage, quoique faible, dans les bassins; les matériaux doivent donc être à l'abri du délavage. L'eau en circulation produit aussi des

compressions d'air auquel il faut ménager dans le mur du quai des ventouses d'échappement; autrement il démolirait le pavage.

L'avantage du type est de briser la vague d'abord sur le talus à 45° du revêtement, puis sur le talus doux supérieur qu'elle frappe normalement en retombant; le mur d'abri ne reçoit qu'un choc affaibli et la lame ne peut le franchir; elle est *bue*, disait Pascal. Les qualités spéciales attachées aux détails du profil ont souvent, par malheur, été méconnues.

Les travaux doivent être menés de front, au moins à partir d'une certaine hauteur, afin d'assurer la protection mutuelle des matériaux. Cette sujétion, celle de l'emploi alterné des catégories, entraînent des difficultés d'installation des chantiers. Néanmoins, le type a été généralement adopté dans la Méditerranée.

La baie de Marseille est très abritée. On avait prévu le revêtement en blocs jusqu'à la profondeur de 10 mètres; l'expérience a indiqué qu'il suffisait de 6 mètres; au contraire, on a reconnu nécessaire de porter à 14 mètres cubes le volume des blocs dans les derniers ouvrages.

Le profil de Marseille ne doit être considéré que comme un minimum; et pourtant en l'appliquant dans d'autres localités, on n'a songé qu'à l'affaiblir, pour des motifs d'économie injustifiés dans les travaux maritimes, où il faut faire bien pour éviter de plus grands frais de consolidation.

Oran (1860-1882) (fig. 170).— Dans un premier profil, le revêtement ne descendait qu'à — 6 mètres et son épaisseur était de 4 mètres. En une tempête (1869) 55 mètres de longueur du môle furent détruits. On

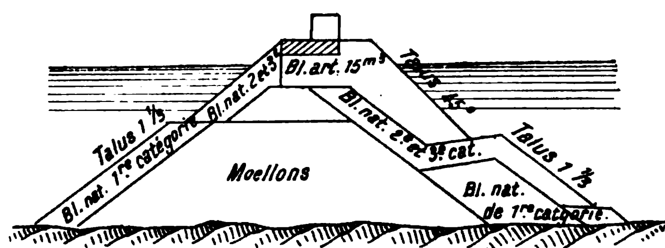


Fig. 170. — Môles d'Oran.

adopta alors le nouveau profil avec risberme à — 9,50 *m* et deux rangées de blocs; il a donné de bons résultats là où il a pu être appliqué. Mais les matériaux du môle bouleversé en 1869 avaient été étalés par la mer à une profondeur inférieure à — 9,50 *m* et ils empêchaient de

descendre les blocs, auxquels vainement on donna le volume de 30 mètres cubes. Une nouvelle tempête détruisit encore en 1876 cette portion qui, à peine réparée, fut de nouveau gravement endommagée en 1886. On la reconstruisit d'après un nouveau profil où le parapet, formé de blocs indépendants de 6,80 *m* de hauteur, est protégé jusqu'à la cote +4 mètres par un revêtement de gros blocs.

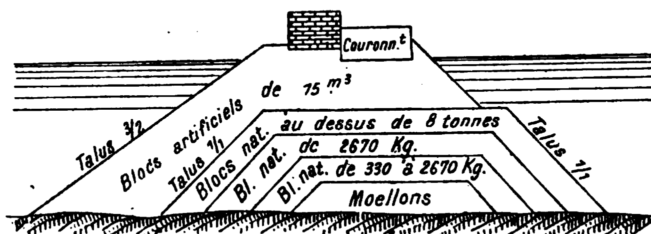


Fig. 171. — Môle de Ténès.

La figure 171 indique les différences qui caractérisent le môle de *Ténès* (1891).

Philippeville (1861-1894). — On a dû adopter définitivement, après plusieurs désastres, le profil de la figure 172. Les blocs de protection sont

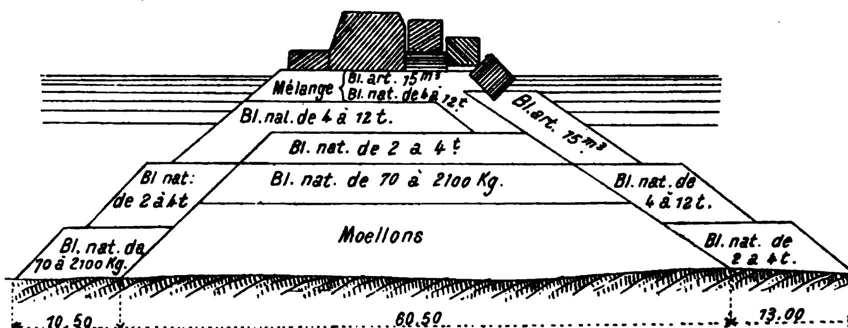


Fig. 172. — Môle de Philippeville.

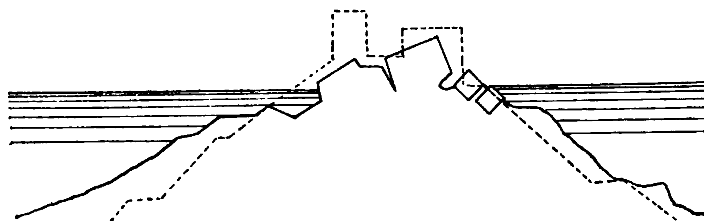


Fig. 173. — Môle de Philippeville après la tempête.

disposés parallèlement au môle, exposant ainsi leur surface maxima à la vague ; aussi avaient-ils été non seulement remués, mais même pro-

jetés jusque sur le talus intérieur. Il y eut d'abord une seule de ces rangées, puis trois; deux eussent suffi, bien placées. Nous donnons aussi figure 173 le profil du môle après la tempête du 27 janvier 1878.

Boulogne (1878-1889) (fig. 174). — Au môle Carnot, à Boulogne, le système de protection est bien compris; aussi n'a-t-on jamais eu d'avaries importantes; il est juste d'ajouter que la mer n'y est pas très

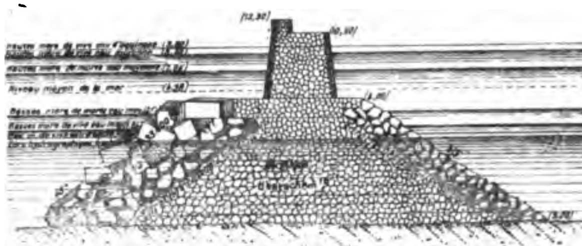


Fig. 174. — Boulogne.

violente, le *fetch* étant limité par les côtes anglaises. Le profil que nous donnons est pris près du musoir; la protection va en augmentant à mesure qu'on s'éloigne de la terre. Sur les 1100 premiers mètres, où le môle est presque perpendiculaire au rivage et est, en conséquence, frappé très obliquement par la lame, le talus du large n'est recouvert que de blocs naturels de 8 tonnes.

Dans ces ouvrages récents, pour éviter l'énorme volume d'enrochements nécessité par l'aplatissement du talus, on n'élève le substratum que peu au-dessus de la basse mer, et la superstructure commence à ce niveau pour dépasser le niveau des hautes eaux. Un parapet du côté du large abrite le passage sur le môle.

Cherbourg, nouveau môle (fig. 175) — Les môles qu'on a construits récemment à Cherbourg pour diminuer la largeur des passes sont

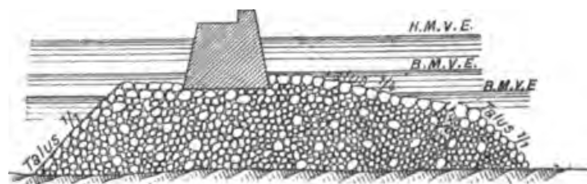


Fig. 175. — Cherbourg. Nouveaux môles.

formés d'enrochements tels qu'ils proviennent de la carrière, élevés à la cote 0; le talus du large est recouvert de pierres de 5 à 20 tonnes.

La superstructure en maçonnerie repose sur une double rangée de blocs artificiels de 40 mètres cubes; elle s'élève à 2 mètres au-dessus des plus hautes eaux.

Leixoes. — La figure 176 indique le mode de construction des môles de Leixoes, qui ne présente rien de particulier.

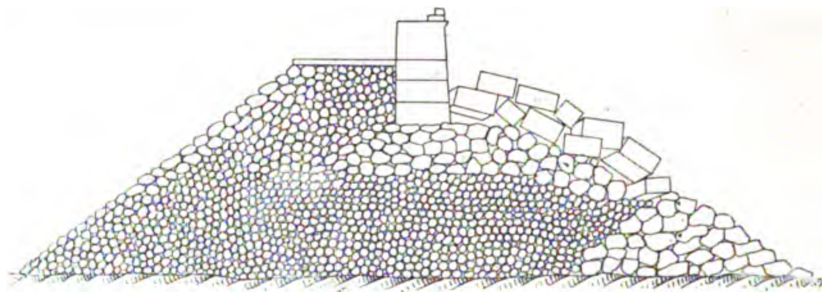


Fig. 176. — Leixoes.

Trieste (1868-1874) (fig. 177). — La baie de Trieste est très abritée; aussi, tout en conservant le type général, a-t-on remplacé dans la digue les blocs artificiels de protection par des pierres de 4 tonnes, excepté au mur de garde, formé de blocs de 10 mètres cubes construits sur place. La caractéristique de cet ouvrage est l'augmentation de la quantité des petits matériaux, qu'on répandait sur le fond vaseux où ils

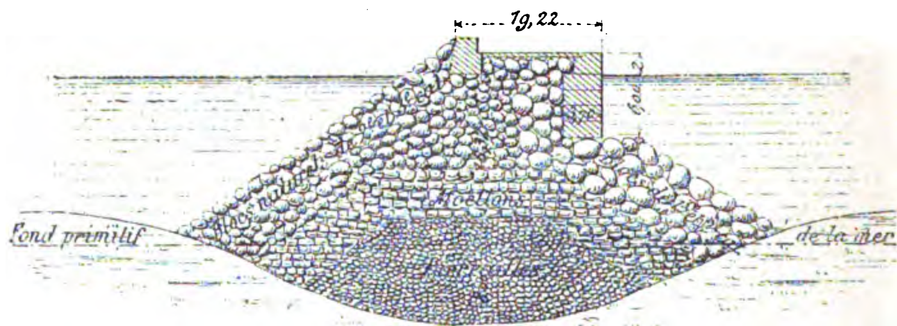


Fig. 177. — Trieste.

s'enfonçaient en déplaçant la vase. Mais la stabilité est loin d'être complète à cause de la nature du fond et l'on procède à de fréquents rechargements.

Les nombreux autres ouvrages construits sur ce type dans la Méditerranée ne présentent aucune particularité. On l'a modifié à *Port-Saïd* à cause de la difficulté de trouver des pierres; les blocs artificiels de

10 mètres qu'on employait seuls ne se composaient que d'un mortier de sable et chaux du Teil; quand on put, le canal ouvert, se procurer des enrochements au Gebel Geneffe, près de Suez, on les posa en sub-

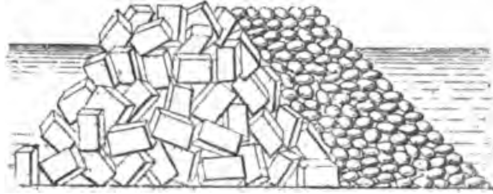


Fig. 178. — Alexandrie.

stratum. A *Alexandrie* le môle est construit uniquement en blocs artificiels de 20 mètres cubes formant un noyau extérieur, le long duquel ont été versés à l'intérieur des enrochements (fig. 178).

Libau, en construction (fig. 179). — Les digues du port militaire de Libau se composent d'un enrochement arasé à la cote — 6 mètres, sur-

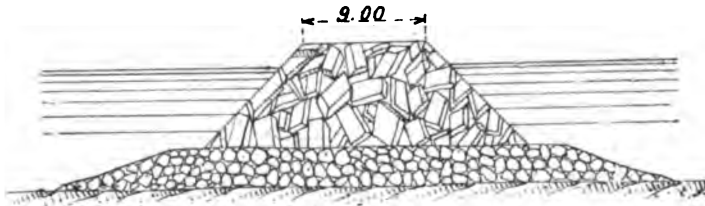


Fig. 179. — Libau.

monté de blocs jetés pêle-mêle, ayant 9 mètres au couronnement, avec des talus de 45°.

VI. — ENROCHEMENTS RECOUVERTS DE BLOCS ARRIMÉS

Gênes, *Môle Galliera* (1877-88) (fig. 180). — L'ingénieur Parodi voulut dans la construction des môles de Gênes combiner la stabilité maxima

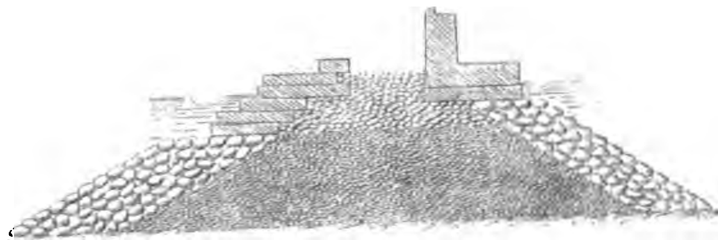


Fig. 180. — Gênes. Môle Galliera.

avec le cube minimum. Les blocs artificiels sont établis en assises horizontales régulières, la petite face au large, en retrait les unes sur les autres, simulant un talus de $\frac{1}{1}$ au large. Le mur d'abri est à **20** mètres de l'arête extérieure. Profondeur de **16** à **30** mètres. Longueur : **1560** mètres.

Ce système a été appliqué aux môles de Gênes, à ceux de Naples (San Vincenzo), de Cagliari et de plusieurs petits ports. Cependant à la nouvelle digue de **Naples** (fig. 181) on est revenu à l'ancien type (1).

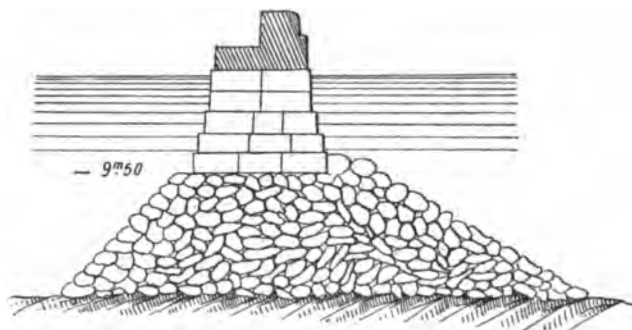


Fig. 181. — Nouvelle digue de Naples.

Vu le succès de ces ouvrages, on a jugé préférable de commencer le revêtement en blocs dès le fond même de la mer, ou à peu près, et de limiter ainsi le cube des enrochements dont on peut utiliser les qualités inférieures. C'est le type adopté aujourd'hui par les ingénieurs italiens.

Civita-Vecchia (1887-1895) (fig. 182). — Les enrochements ont été arrêtés à la cote — 15 mètres. Le revêtement intérieur est à peine

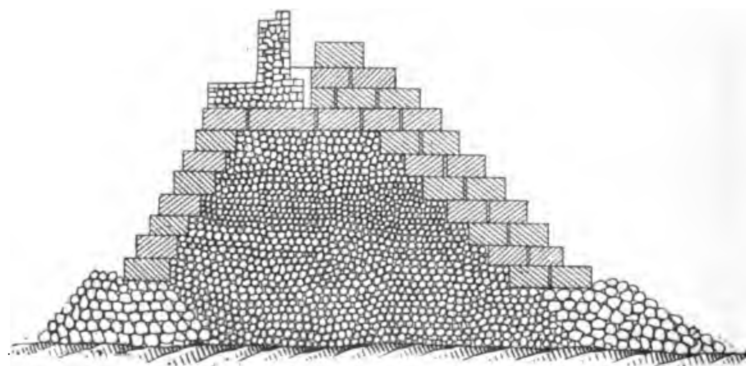


Fig. 182. — Môle de Civita-Vecchia.

(1) Nous devons tous les renseignements nouveaux sur Naples à l'obligeance de MM. les Ingénieurs Rava et Coen Cagli surtout.

incliné, l'autre un peu plus. Le mur d'abri est presque entièrement couvert par les blocs du revêtement externe.

Livourne. *Digue de la Vegliaia* (1887-1893) (fig. 183). — Le talus intérieur est de $\frac{0,60}{1}$, l'extérieur de $\frac{1}{1}$. Sur le sommet, il n'y a qu'un bloc construit en place.

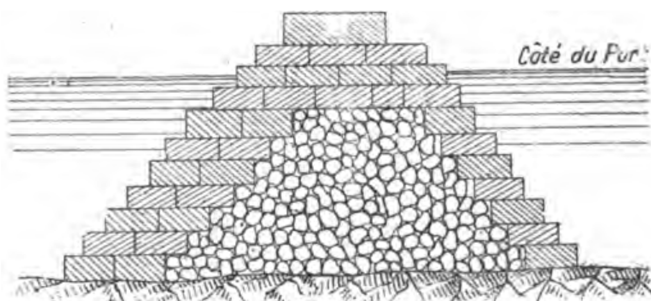


Fig. 183. — Livourne. La Vegliaia.

A Barletta et à Cotrone, le talus externe est protégé de la même façon; l'interne n'est formé que d'enrochements, sans protection.

Odessa (fig. 184). — Enrochements arasés à — 6,70 *m*. Superstructure de 7,30 *m* d'épaisseur, construite en blocs de 22 tonnes.

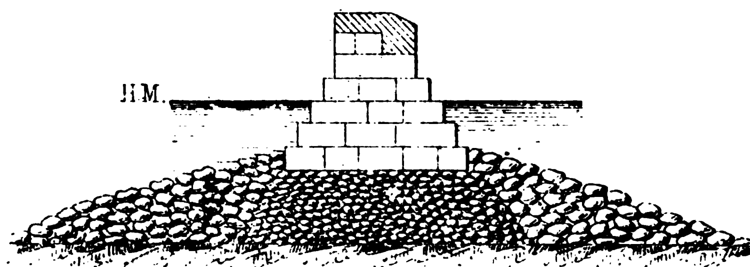


Fig. 184. — Odessa.

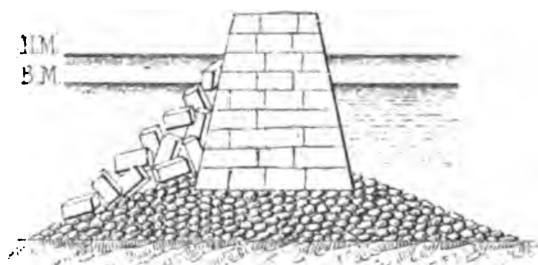


Fig. 185. — Ijmuiden.

Ijmuiden (fig. 185). — L'enrochement n'a qu'un mètre d'épaisseur

et n'est destiné qu'à prévenir les affouillements. Les blocs de la superstructure composée d'un mur vertical ont de **6** à **12** tonnes; ceux des quatre assises supérieures sont reliés par des crampons en fer. Il a fallu protéger le pied par des blocs jetés pêle-mêle.

Longueur des môles: **1 500** mètres chacun. Amplitude de la marée: **1,70** *m.*

Cette (**1882-1889**) (fig. **186**). — Le prolongement de la digue de Cette a été fait au moyen de blocs arrimés horizontalement, au-dessus d'une superstructure en enrochements. Longueur: **850** mètres.

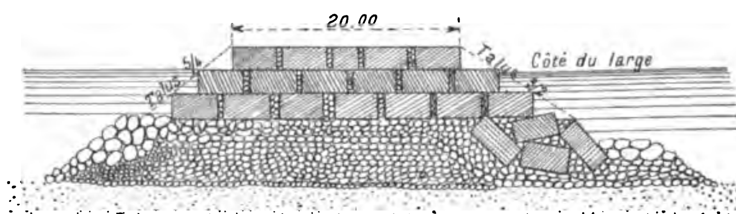


Fig. 186. — Digue de Cette.

Gisborne (fig. **187**). — A ce môle, construit en Nouvelle-Zélande durant ces dernières années, on a posé les blocs horizontalement, sur une couche de blocs-sacs destinés uniquement à établir l'horizontalité et la concordance des assises; c'est un grand travail de sujétion.

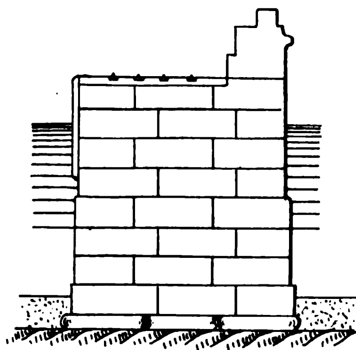


Fig. 187. — Môle de Gisborne.

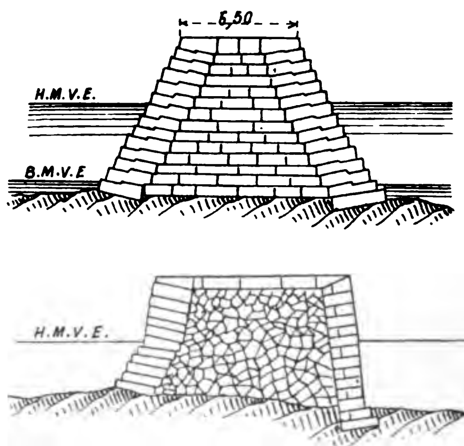


Fig. 188. — Môle de Seaham.

Seaham (fig. **188**).— A Seaham, le môle nord-est est construit suivant deux types différents selon le degré d'exposition; mais les deux offrent le caractère commun d'avoir les blocs de parement inclinés vers l'intérieur, précaution qui ajoute évidemment beaucoup à la stabilité de l'ouvrage.

Valence (en construction) (fig. 189). — Le profil type, pour les grandes profondeurs, comprend :

Un enrochement composé de catégories de diverses classes dont les

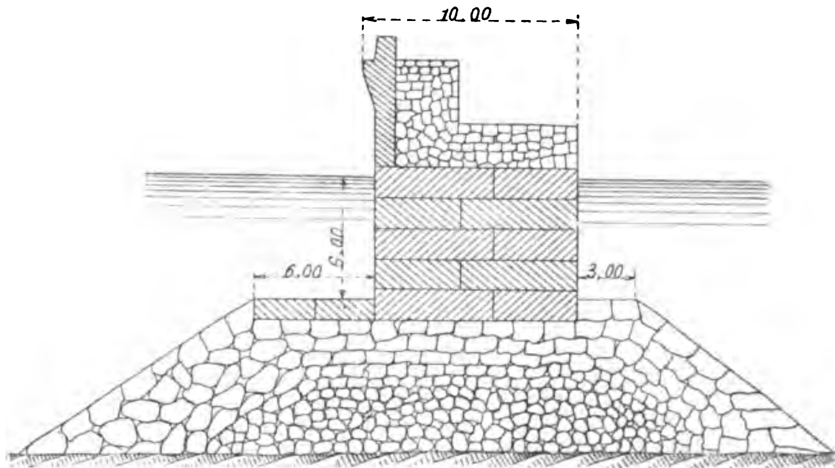


Fig. 189. — Valence.

plus volumineuses sont extérieures ; la berme est protégée par des blocs de 12 tonnes ;

Une superstructure verticale formée de cinq assises de blocs artificiels de béton, dont le poids varie de 20 à 40 tonnes ; l'épaisseur du mur est de 10 mètres, sa hauteur de 7,50 *m* ;

Un massif de maçonnerie de 2,10 *m* de hauteur, surmonté d'un mur de garde couronné par un parapet (1).

Wilhemshaven. — La figure 190 représente le môle de Wilhemshaven, combinaison de blocs, de maçonnerie et de béton.

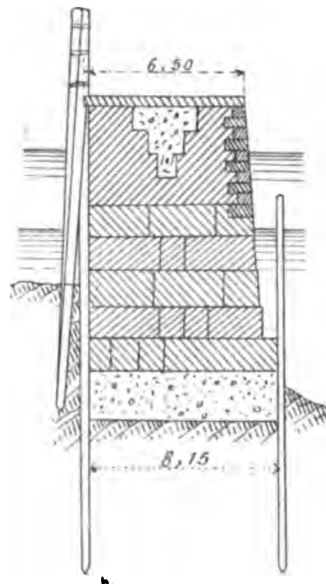


Fig. 190. — Môle de Wilhemshaven.

Bilbao. — *Ancien môle de Portugalete.* (fig. 191). Le môle de Portuga-

(1) Tous les renseignements sur Valence sont dus à l'obligeance de l'ingénieur M. Manuel Maese, directeur des travaux du Port.

lete, qui continue la rive gauche du Nervion sur **800** mètres de longueur, affecte en plan la forme d'un arc de cercle de **3 000** mètres de rayon et s'avance directement dans le golfe triangulaire (*Abra*) où

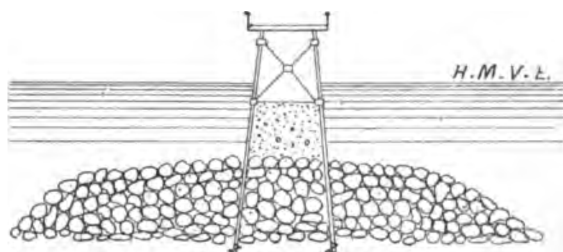


Fig. 191. — Bilbao. Portugalete.

débouche le fleuve. Les vagues le frappent donc très obliquement. Aussi, les **600** premiers mètres sont-ils seulement composés d'un enrochement dont les pierres, il est vrai, pèsent au minimum une tonne. Ce substratum, arasé au niveau de basse mer, est surmonté d'un massif de béton, coulé entre les pieux de l'appontement métallique qui, après avoir servi à la pose des pierres, a été conservé.

Les **200** derniers mètres, plus exposés, sont formés du même enrochement, mais les talus de l'ouest et ceux du musoir sont protégés par des blocs artificiels de **27** tonnes. Sur le couronnement, au niveau de basse mer, est établie une chape de béton de **50** *cm* d'épaisseur, qui porte la superstructure, parementée en blocs artificiels de **13** tonnes au ciment de Portland, avec comblement intérieur en béton au ciment de Zumaya (fig. **192**).

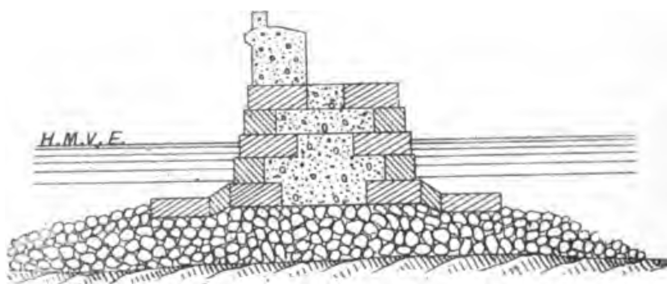


Fig. 192. — Bilbao. Môle de l'Ouest.

La largeur de ce massif est de **10** mètres à la base; quatre retraites successives dans les parements, de **25** *cm* chacune, réduisent cette largeur à **8** mètres au couronnement, établi à **7,50** *m* au-dessus du niveau

de basse mer. Au musoir, les largeurs respectives sont 14 et 12 mètres. Un parapet de 3×3 mètres en maçonnerie protège le tout.

Au pied de chaque parement existe une berme de défense en blocs artificiels de 27 tonnes (3×1,50×1,30 *m*).

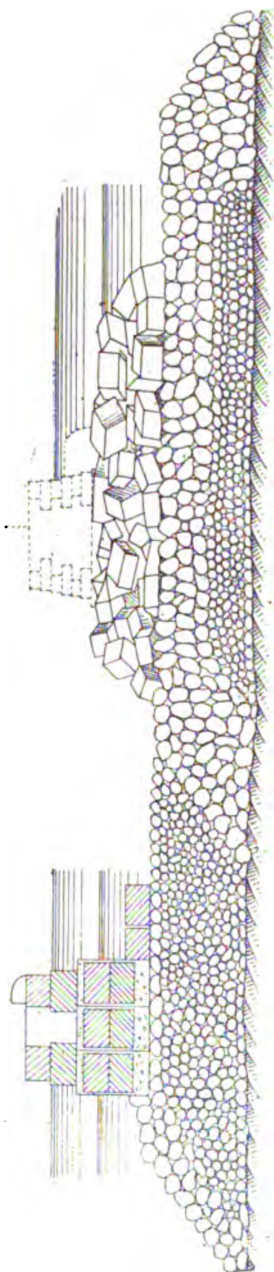
Môles de l'avant-port. — *Môle de l'Ouest* (en construction). — Il a été projeté avec le profil suivant : Un enrochement arasé à la cote — 6 mètres, ayant au maximum 80 mètres et 54 mètres comme bases inférieure et supérieure, supportait un massif de blocs artificiels de 30 et 50 mètres cubes jetés pêle-mêle jusqu'au niveau de basse mer et ayant 45 mètres et 30 mètres de largeurs respectives, les vides étant remplis de moellons. Sur une couche de béton nivelant le couronnement reposait une superstructure de 12,20 *m* d'épaisseur à la base inférieure et 10,20 *m* à la supérieure située à la cote + 7 mètres, composée de blocs de 3×1,50×1 mètres posés en parpaings et boutisses et réunis par du béton en ciment de Zumaya; enfin un parapet de 4 mètres de largeur sur 3 mètres de hauteur protégeait l'ensemble.

C'était donc à peu près le type de Saint-Jean-de-Luz, qui a bien tenu ; mais la forme triangulaire de l'*Abra* de Bilbao augmente beaucoup la force des vagues. Elles commencèrent par enlever les moellons de remplissage des vides entre les blocs pêle-mêle et il en résulta un tassement tel qu'une partie de la superstructure fut détruite par une tempête.

Nouveau profil (fig. 193). — On continua la construction avec le profil précédent, pour le substratum. Le massif de blocs pêle-mêle terminé reste comme défense extérieure. Intérieurement, on a élargi l'enrochement en l'arasant à la cote — 5 mètres, et à une distance de 47,60 *m* d'axe en axe de l'ancienne, on a édifié une nouvelle superstructure, construite dans des caissons en fer de 13×7×7 mètres, qui dépassent de 2 mètres le niveau de la pleine mer ; ces caissons sont remplis de 12 blocs de 30 mètres cubes disposés en deux étages, dont les dimensions sont 4×3×2,50 *m* et qui laissent par conséquent entre eux et au-dessus d'eux des vides que l'on remplit de béton au ciment de Portland. On obtient en définitive un monolithe de 637 mètres cubes ou 1 300 tonnes qui dépasse de 2 mètres le niveau de basse mer. C'est sur cette base que s'élève la superstructure.

Elle se compose d'un mur de 11 mètres de largeur sur 6 mètres de

hauteur formé d'un parement en blocs et d'un remplissage de béton; le tout est surmonté par un parapet.





Plan d'un caisson.

Fig. 193. — Bilbao.

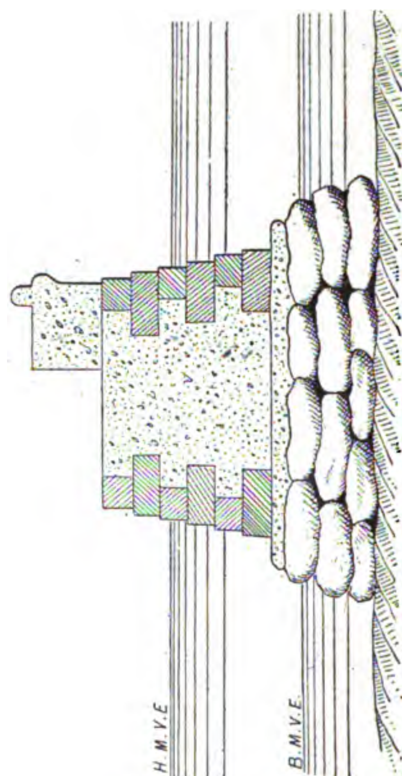


Fig. 194. — Contre-môle de Bilbao.

La superstructure totale pèse 1 000 tonnes par 7 mètres courants de longueur.

Entre l'ancien môle abandonné et le nouveau, règne un canal de 80 mètres de largeur où la vague, brisée par le premier ouvrage qui agit comme récif, perd la majeure partie de sa violence.

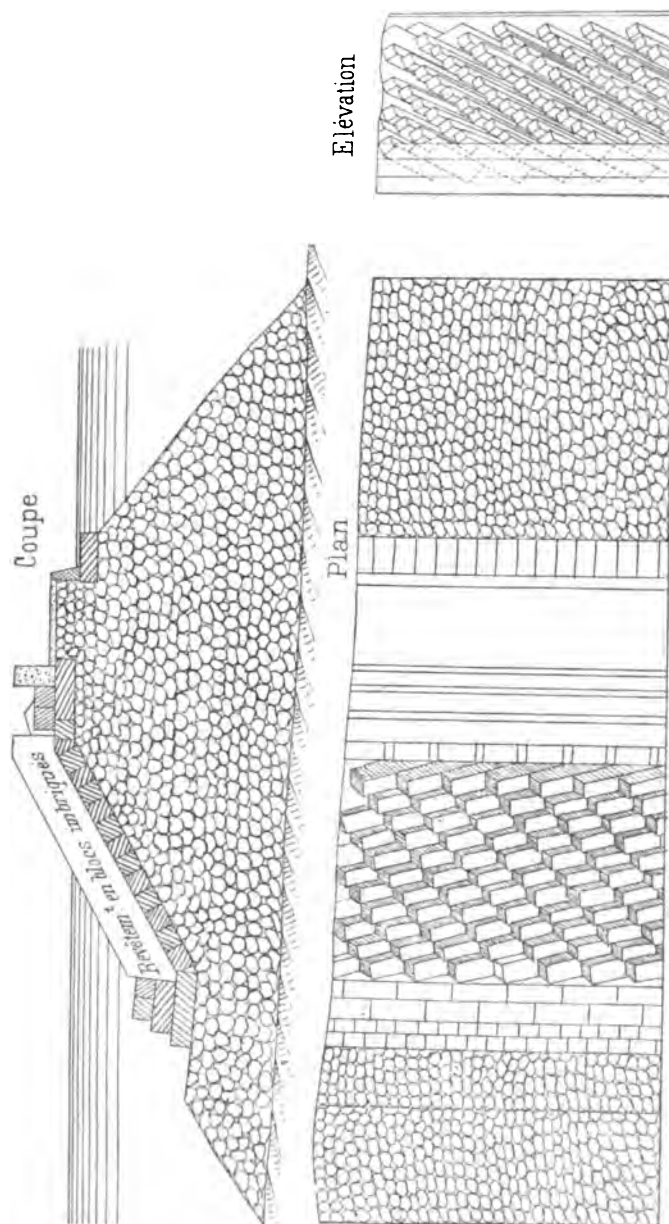


Fig. 195. — Môle de Carthagène.

Môle-est ou contre-môle (en construction). — Le môle est qui arrive aux profondeurs de 11 mètres est beaucoup plus abrité ; aussi lui a-t-on donné un profil plus simple. Sur un enrochement arasé à — 4 mètres repose un massif de blocs de 50 mètres cubes jetés pêle-mêle et dont les vides sont remplis de sacs de béton. La figure 194 donne le profil de la superstructure, analogue aux précédentes. Les sacs de béton mesurent les uns 4,50 m^3 et les autres 7,60 m^3 (1).

Carthagène, *Môle de Navidad* (fig. 195). — Plus remarquable encore que les ouvrages italiens par la régularité de la pose des blocs, le môle de Navidad mesure 150 mètres de longueur. Il a été établi en enrochements de toutes grosseurs, le talus étant de $\frac{1}{1\ 1/4}$ à l'intérieur et de $\frac{1}{2}$ à l'extérieur. Ces enrochements arrivent jusqu'au niveau de la mer. Une risberme établie à la cote — 9 mètres reçoit trois rangs de blocs superposés. Au-dessus, le talus externe est revêtu d'un pavage jointif en blocs artificiels ($4 \times 1,50 \times 1,50$ *m*) protégé par une couche de blocs posés en rangs horizontaux imbriqués se recouvrant d'un tiers de leur longueur. Ces blocs ont été mis en place par une bigue flottante avec une étonnante régularité qui, paraît-il, n'a pas entraîné de dépenses supplémentaires.

BLOCS ARTIFICIELS PÊLE-MÊLE AVEC SUPERSTRUCTURE

VII. — **Livourne** (1856-1866) (fig. 196). — Les blocs artificiels ont

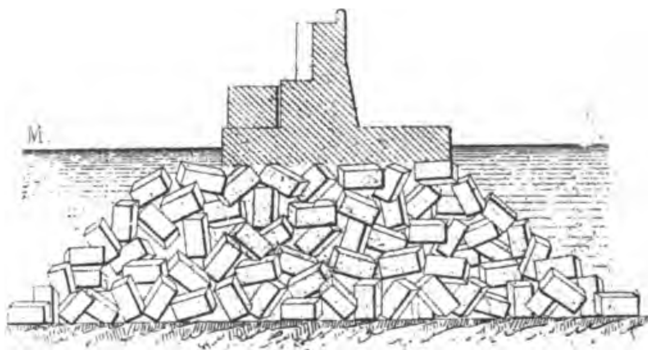


Fig. 196. — Livourne.

de 10 à 20 mètres cubes ; à **Socoa** 20 mètres cubes. Dans ce dernier, le parement de la superstructure est en arc de cercle de 8 à 11 mètres

(1) Les renseignements sur Bilbao sont dus à l'inépuisable obligeance de M. l'Ingénieur Evaristo de Churruca, directeur des travaux.

de rayon ; la plateforme est soigneusement pavée en pierres de taille.

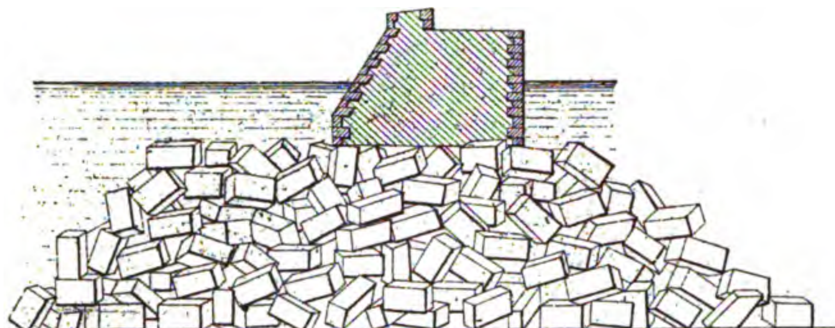
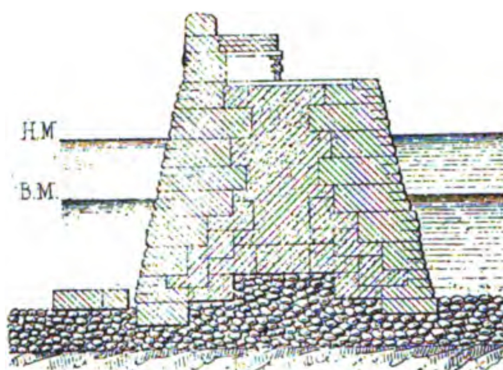


Fig. 197. — Artha.

A la digue d'**Artha** (fig. 197), le profil de la superstructure est différent, mais le mode de construction est identique.

Tynemouth (1856-18 ..) (fig. 198). — Les môles établis à l'embou-



Tynemouth Nord

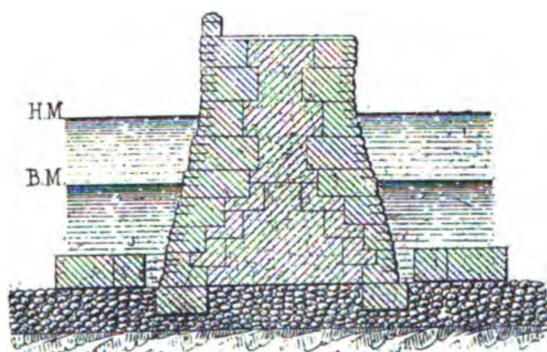


Fig. 198. — Tynemouth Sud.

chure de la Tyne ont été commencés en enrochements, avec superstruc-

ture établie d'abord au niveau de basse mer ; mais des avaries obligèrent à la descendre à la cote — 6,25 *m*. Elle se compose de deux murs parallèles en blocs de 36 tonnes, réunis par du béton coulé en masse. Les môles s'avancent par les fonds de 9 mètres. Amplitude de la marée : 4,50 *m*.

BLOCS ARTIFICIELS EN ASSISES RÉGULIÈRES INCLINÉES

VIII. — Le système a été adopté pour permettre à chaque assise de tasser d'une façon indépendante.

Manora (1869-1870) (fig. 199). — Le môle de Manora, qui protège le port de Karachi, atteint les profondeurs de 8,25 *m*. Amplitude de

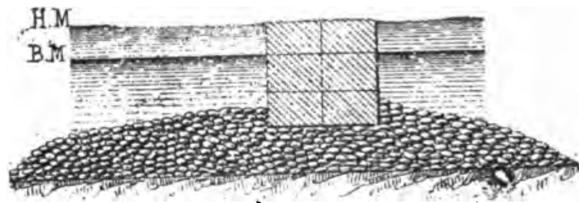


Fig. 199. — Manora.

la marée : 3,60 *m*. La base en enrochements a été nivelée à — 5 mètres et légèrement excavée pour recevoir la superstructure.

Celle-ci se compose de trois assises indépendantes, chacune de deux blocs du poids de 27 tonnes ($3,65 \times 2,45 \times 1,37\, m = 12,30\, m^3$). Ces blocs sont posés côte à côte de champ sans mortier. Pour faciliter la pose et assurer la stabilité, on les a inclinés en arrière de $\frac{1}{5}$ (76°). Ils sont enfin recouverts par une chape générale de béton, reliée par des queues d'aronde avec le bloc sous-jacent.

La largeur de la superstructure est de 7,30 *m* et sa hauteur de 6 mètres est en partie enterrée dans les enrochements; la largeur serait bien faible pour toute localité autre que Manora, où les tempêtes sont inconnues. Le sommet des blocs n'atteint pas le niveau des hautes mers, mais seulement celui de mi-marée ; aussi la vague passe-t-elle par-dessus. A l'origine, le choc ainsi produit a suffi pour rejeter dans le chenal un certain nombre de blocs; on les a réunis par du béton, et depuis les accidents ne se sont pas représentés. Même dans les plus fortes moussons, la vague se brise suffisamment sur l'ouvrage, pour ne pas agiter d'une façon incommode le chenal.

Libau, port militaire (en construction) (fig. 200). — Substratum arasé à — 6 mètres ; superstructure de cinq rangées de blocs de 20 et 30 tonnes, ceux-ci ayant 3,60 × 2 × 1,80 *m*. Rangée inférieure composée de trois d'entre eux, la largeur est donc 10,80 *m*. Les quatre autres

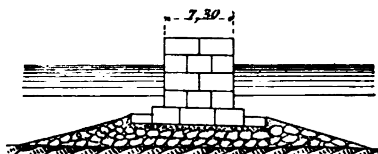


Fig. 200. — Môle du nord, Libau.

renferment alternativement deux blocs de 30 et trois de 20 tonnes, la longueur de ceux-ci étant de 2,40 *m*. Deux blocs latéraux forment encore risberme et l'enrochement est élevé à leur niveau.

Les musoirs contiennent une rangée de blocs de plus et leur plateforme, qui domine le môle de 1,80 *m*, est protégée par un parapet en pierres de taille.

Madras (1876-1881) (fig. 201). — La superstructure est pareille à la précédente, mais comprend quatre assises de blocs, les inférieurs étant plus larges et moins hauts que les autres ; chaque bloc portait à sa surface supérieure un tenon pénétrant dans une mortaise pratiquée sur

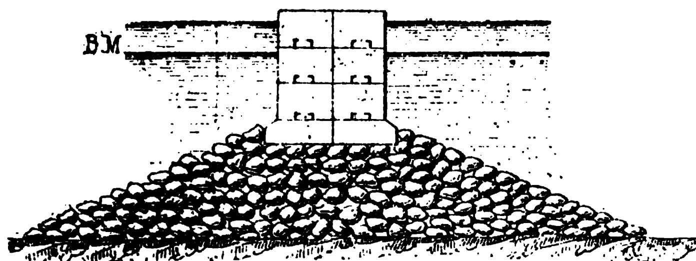


Fig. 201. — Môle de Madras.

la base du bloc supérieur. Un cyclone, en novembre 1881, a détruit complètement les parties du môle sur lesquelles les vagues frappaient normalement. Il a été rétabli depuis plus solidement.

Colombo (1875-1885) (fig. 202). — Le môle de Colombo comporte une base en pierres perdues, dont le niveau d'arasement est à — 4 mètres près de terre et arrive à — 6,25 *m* au musoir.

La superstructure, sur les 400 premiers mètres, se compose de deux murs parallèles laissant entre eux un espace de 4,25 *m* rempli de moellons; le mur extérieur est épais de 7,30 *m*, l'intérieur de 3,65 *m*. Le premier est formé de deux assises de blocs de 28 tonnes surmontées de trois de 14 à 26 tonnes.

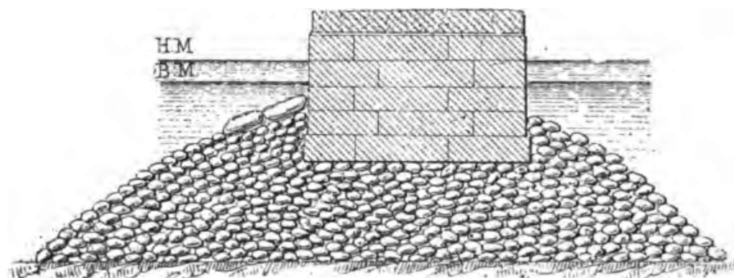


Fig. 202. — Môle de Colombo.

Au delà, la superstructure n'est formée que d'un seul mur vertical de 10,40 *m* d'épaisseur, composé de quatre à cinq assises de blocs pesant de 17 à 31 tonnes. Tous ces blocs sont inclinés de 68°.

La risberme est protégée par des sacs de béton pesant 10 tonnes.

La surface supérieure est recouverte par une chape générale de béton dont la largeur varie de 15 mètres près de terre à 9,40 *m* à l'extrémité; l'épaisseur est au centre de 1,25 *m* et sur les bords de 1 mètre.

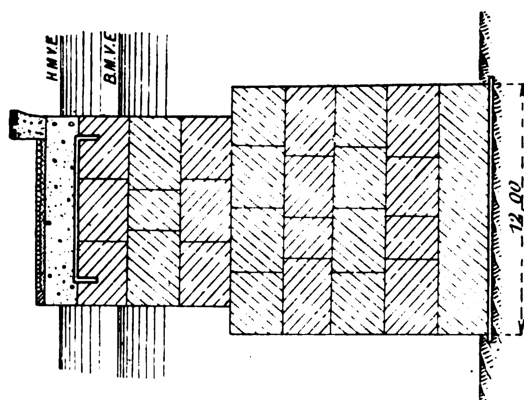
Longueur : 1 280 mètres.

On a constaté au môle de Colombo un fait intéressant. La mer frappe le plus vigoureusement dans l'espace compris entre les 100 et 300 premiers mètres de la longueur par des fonds de 5,50 à 7,30 *m*.

Port de la Luz, Grande Canarie (1881-1898) (fig.203). — Le môle de la Luz qui a un kilomètre de longueur est construit en blocs artificiels de 12 mètres cubes inclinés suivant un angle de 60°. Le fond de la mer est du rocher, sur lequel reposent directement les blocs; quelques poches de sable qui s'y rencontrent sont vidées par des plongeurs et comblées par du béton. La rangée inférieure a 42 mètres de largeur; les autres seulement 9 mètres; le tout est recouvert par une couche de béton sur lequel s'étend un pavage basaltique qui s'élève à 1,30 *m* au-dessus des plus hautes mers.

Le contre-môle (fig. 204) consiste en deux murs parallèles formés de blocs, réunis tous les vingt mètres par des murs de refend; les cases sont

remplies d'enrochements. L'ensemble a 20 mètres de largeur (1). Ce type semble être en faveur en Espagne.



(Coupe).

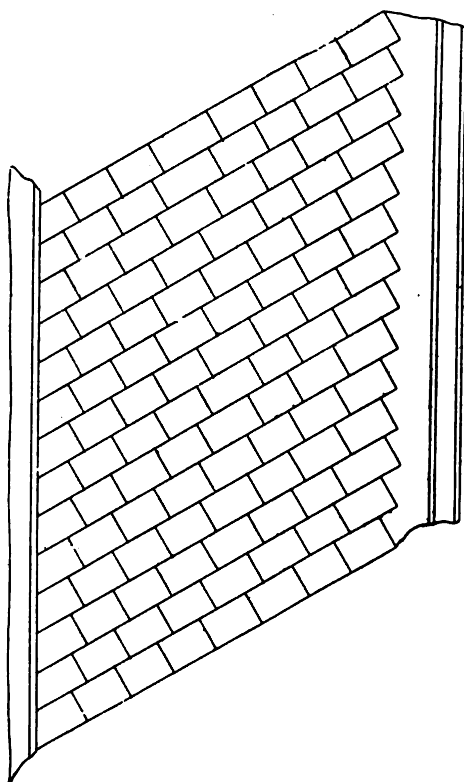


Fig. 203. — Môle de la Luz (Élévation).

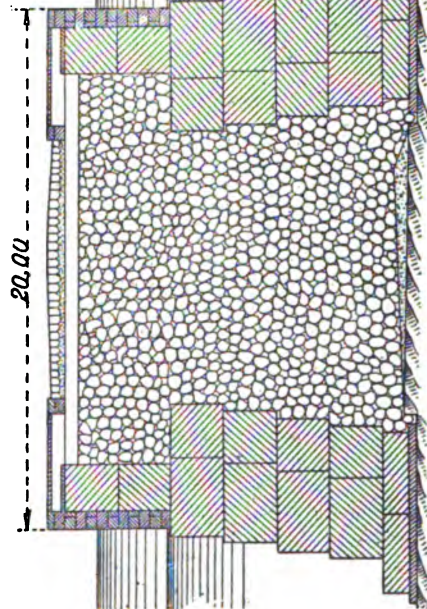


Fig. 204. — Contre-môle de la Luz. (Coupe).

Musel (en construction) (fig. 205). — Au port de Musel, à Gijon (Es-

(1) Les renseignements sur le port de la Luz sont dus à l'obligeance de l'Ingénieur directeur des travaux du Port, M. Juan de Leon y Castillo

pagne), le môle nord, de 1 050 mètres de longueur, se compose de deux murs parallèles, situés à 25 mètres de distance d'axe en axe et composés de blocs artificiels, assis sur une fondation en blocs-sacs. Les murs sont réunis, de distance en distance, par des traverses construites de la même façon et les cases intérieures sont remplies d'enrochements.

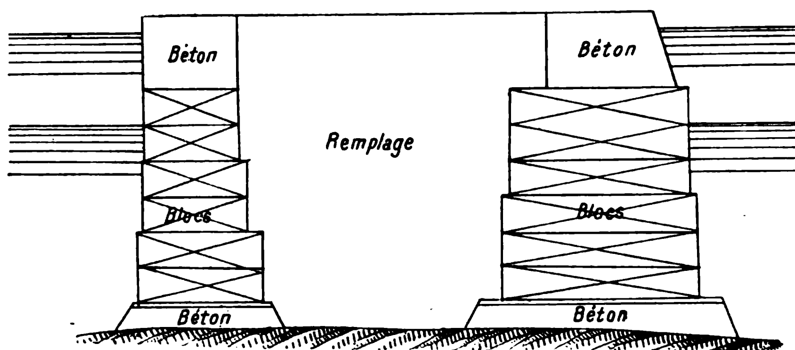


Fig. 205. — Môle de Gijon.

Les sacs de béton cubent de 2 à 4 mètres. Le mur extérieur a à la base 12 mètres de largeur, l'autre la moitié. Les blocs les plus volumineux mesurent 6×3×2 mètres cubes.

Sur les rangées de blocs qui s'élèvent à un mètre au-dessus du niveau des basses mers s'étend un mur en béton de cinq mètres d'épaisseur. Il dépasse d'un mètre la hauteur des plus hautes eaux (1).

Constantza. — Angle d'inclinaison 48°; le substratum s'arrête à — 5 mètres. Superstructure : Assises de 4 blocs de 30 tonnes, ayant tous 1,80 *m* de hauteur sur 1,50 *m* de largeur. Longueur variable : celle des blocs de fond est de 5,50 *m*. La partie supérieure est recouverte d'une épaisse couche de béton.

Napier Harbour.— Les figures 206 et 206 *bis* montrent le type qui a

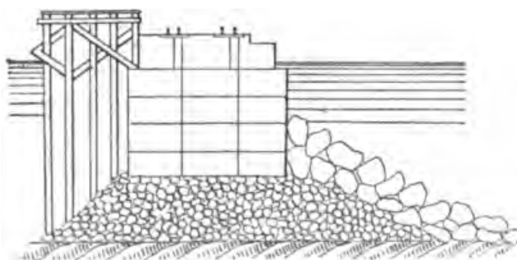


Fig. 206. — Môle de Napier. (Coupe).

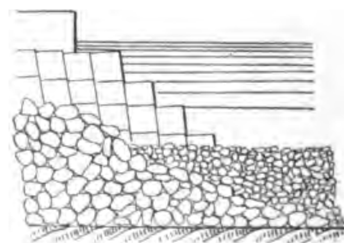


Fig. 206 *bis*. — Môle de Napier. (Élévation).

(1) *Revista de Obras públicas*, 29 décembre 1898.

été employé en Nouvelle-Zélande pour plusieurs môles récemment construits. Blocs de 10 mètres cubes, posés sur un enrochement arasé à — 6 mètres. Risberme extérieure en gros blocs naturels de 5 tonnes; contre le mur s'appuie intérieurement un quai en charpente. Un monolithe de béton coulé en place recouvre les rangées de blocs.

Mormugaô. — Superstructure : 4 assises de 2 blocs chacun; blocs de 37 tonnes. Un mur de garde surmonte le tout et des blocs de 20 tonnes jetés pêle-mêle servent encore de protection au large. Outre les tenons et mortaises comme à Madras, on a encore relié les blocs horizontalement par des crampons de fer. Inclinaison : 70°.

Pointe des Galets, île de la Réunion (1878-1883) (fig. 207).— La situation étant très exposée, on a renoncé à la base en enrochements. On a employé dès le fond des blocs artificiels, arrimés par tranches successives d'une épaisseur uniforme de 2,50 *m*. L'angle d'inclinaison est de 71°. Le nombre des assises augmente de une à cinq, à mesure qu'on avance; la profondeur atteinte est de 15 mètres.

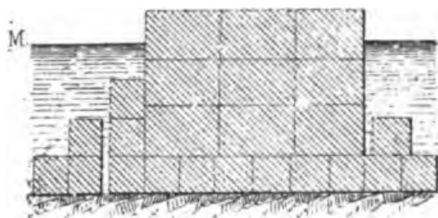


Fig. 207. — Pointe des Galets.

Les assises inférieures sont composées de 5 blocs de 43 tonnes; les supérieures de 3 blocs : celui du milieu pèse 104 tonnes, ceux des côtés 115 tonnes. La face minima est exposée à la lame. Les blocs des diverses assises sont liés ensemble par des sacs de ciment damés dans des rainures en queue d'aronde de 45 *cm* de côté; le pied des môles est protégé contre les affouillements par des blocs de 60 tonnes.

Sur la plateforme, arasée à + 2,90 *m*, un mur de garde est établi sur le côté extérieur.

Amplitude de la marée : 1 mètre.

BLOCS-SACS OU BÉTON COULÉ A L'ÉTAT FRAIS DANS LES SACS

IX.— **Aberdeen**.— *Môle sud* (fig. 208).— Le môle sud d'Aberdeen, qui s'étend suivant un méridien, est établi sur un fond granitique.

Pour niveler la fondation, on a déposé sur l'emplacement du môle, préalablement déblayé du sable par des plongeurs, des petits sacs pleins de béton. Sur cette base, des blocs de 10 à 20 tonnes ont été élevés jusqu'à la cote + 1,25 *m*, avec un talus de 8 sur 1. Les blocs ont été recouverts d'une chape de béton de 5,50 *m* d'épaisseur.

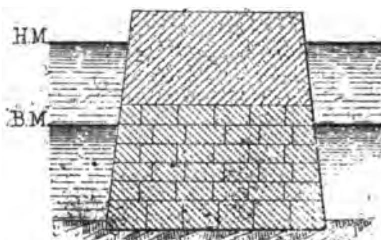


Fig. 208. — Aberdeen, sud.

Le pied du môle, du côté de la mer, a été protégé par une simple rangée de sacs de béton de 100 tonnes. Cette ceinture n'existe que sur les 500 derniers mètres de l'ouvrage.

Les pieux qui supportaient l'échafaudage de pose sont restés dans la maçonnerie (on les entourait de blocs aux angles arrondis), et ils ont été l'une des causes des avaries éprouvées par ce môle.

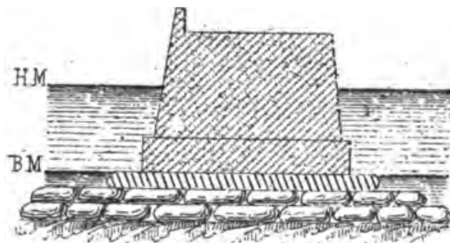


Fig. 209. — Aberdeen, nord.

Môle nord (fig. 209). — La facilité de la pose des sacs employés à la construction du môle sud d'Aberdeen détermina l'emploi de ce procédé en grand pour l'établissement du môle nord. Les fondations sont composées de deux assises de blocs-sacs de 50 tonnes posées longitudinalement et sur une largeur qui dépasse les assises supérieures, afin de former risberme et éviter les affouillements. Les autres assises ont les sacs posés transversalement, sur une largeur de 9 à 16 mètres. Les blocs-sacs sont arrêtés à la cote — 75 *cm* et sont surmontés d'une chape de béton.

Amplitude de la marée : 3,90. — Profondeur au musoir : 7 mètres.

Newhaven (1880-1885) (fig. 210). — Amplitude de la marée : 6 mètres. Les fondations, jusqu'à la cote + 60 *cm*, se composent de blocs en sacs de 100 tonnes ; ils ont 12,80 × 1,80 × 2,40 *m*. Le bloc tassé n'a plus que 75 *cm* de hauteur.

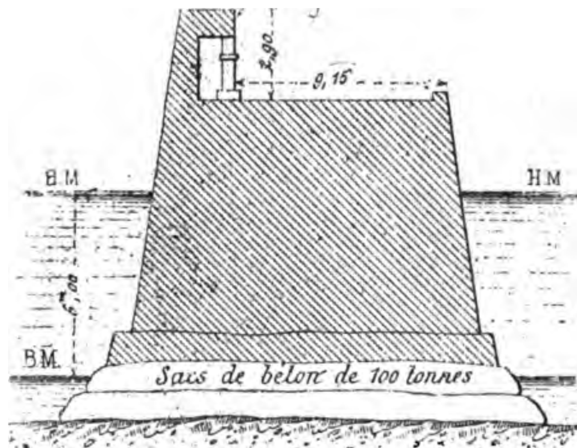


Fig. 210. — Newhaven.

Les fondations sont surmontées d'une chape de béton, construite par sections de 12 mètres de longueur, dans des formes en charpente. Au-dessus s'élève un mur de garde de 2,80 *m* de hauteur, avec galerie couverte.

La Guaira (fig. 211). — Les blocs-sacs inférieurs pèsent 160 ton-

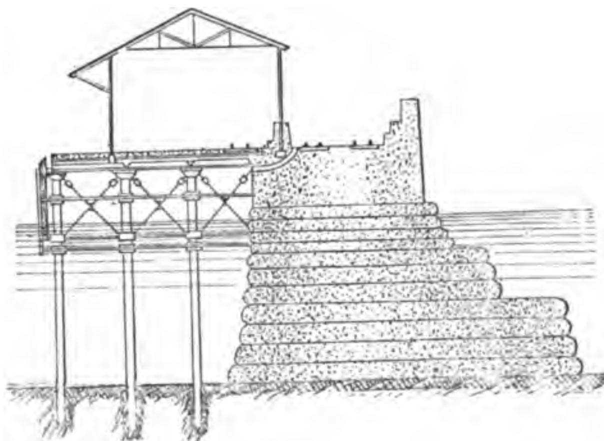


Fig. 211. — La Guaira.

nes ; ils diminuent graduellement de longueur et de poids jusqu'un peu

au-dessus du niveau de la mer où ils s'arrêtent et sont recouverts d'une chape en béton.

Ardrossan (1889-1891) (fig. 212). — Ardrossan est situé sur le Frith de la Clyde, c'est-à-dire la baie abritée où se jette ce fleuve, à 80 kilomètres au-dessous de Glasgow. On y a construit récemment un môle de 400 mètres de longueur, en blocs-sacs de 40 à 50 tonnes à la base, où ils ont 8 mètres de longueur, et qui vont en diminuant jusqu'à 75 *cm* au-dessus de la basse mer; à partir de ce niveau, on a construit la superstructure en béton renfermant des moellons.

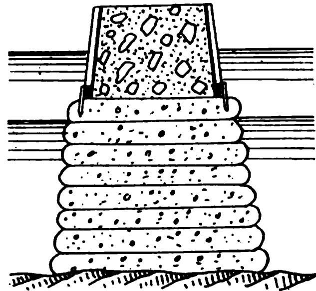


Fig. 212. — Môle d'Ardrossan.

BÉTON EN MASSE

XI. — *a. Béton coulé en place dans des caissons.* — Système employé jadis en Italie, a encore servi en 1849 à la construction d'un môle à *Fiume*. On fabriquait en place, dans des caissons sans fond, des blocs de 1150 tonnes ; la prise terminée après une vingtaine de jours, on démontait la charpente qui servait à un autre massif. Entre deux blocs voisins, on coulait du béton après avoir fermé les côtés par des madriers.

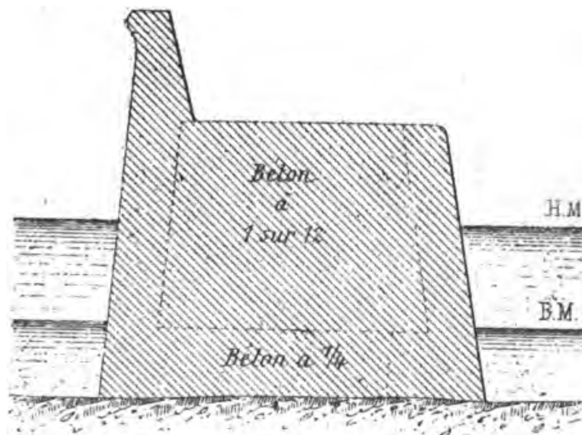


Fig. 213. — Môle de Buckie.

Buckie (1874-1880) (fig. 213). — Le béton a été également coulé dans des caissons démontables.

b. Béton coulé directement en place. — **Wicklow** (1881-1884)

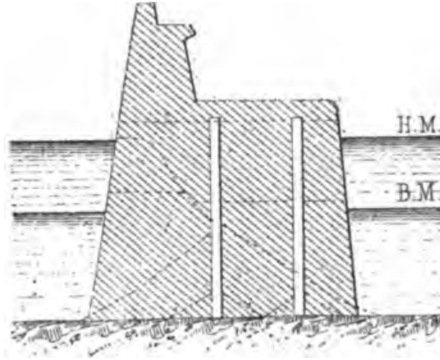


Fig. 214. — Wicklow.

(fig. 214). — Le procédé sera décrit dans le chapitre consacré aux modes de construction des môles.

MURS VERTICAUX EN MAÇONNERIE

X. — **Douvres** (1847-1871) (fig. 215). — Le môle de l'Amirauté a été le premier tronçon d'ouvrages qui devaient faire de Douvres un vaste port de refuge ; construit suivant le type vertical ou du moins légèrement

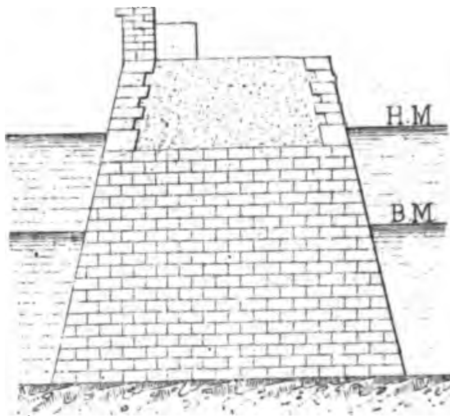


Fig. 215. — Douvres.

incliné à $\frac{1}{3}$ sur un lit dressé par des plongeurs, le mur s'élève en blocs artificiels de 6 mètres cubes environ, parementés en granite. Au-dessus des hautes mers de morte eau, les blocs artificiels sont remplacés par un noyau plein en béton.

Dans les cent derniers mètres du môle, la section a été changée, le talus du large a été réduit à $\frac{1}{6}$ et celui de l'intérieur à $\frac{1}{12}$. Les parements de granite ont été arrêtés à la hauteur des basses mers ; au-dessous tous les blocs sont artificiels.

Le môle a toujours bien résisté; seul le parapet a été détruit en partie en 1877 par une tempête qui le frappait normalement ; ce parapet avait eu son épaisseur réduite pour établir un chemin de fer non prévu au projet.

MURS EN MAÇONNERIE CONSTRUITS A LA MARÉE

XII. — Un grand nombre des ouvrages de protection des ports secondaires, qui ne reçoivent que des navires de faible tirant d'eau, ont pu être construits à la marée, c'est-à-dire à basse mer. On les établit en maçonnerie, le plus souvent avec un remblai de moellons à sec (**Port**

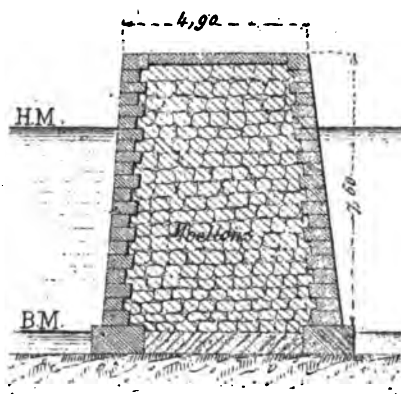


Fig. 216. — Port Joinville.

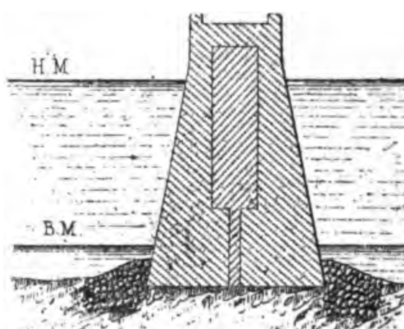


Fig. 217. — Saint-Gilles-sur-Vie.

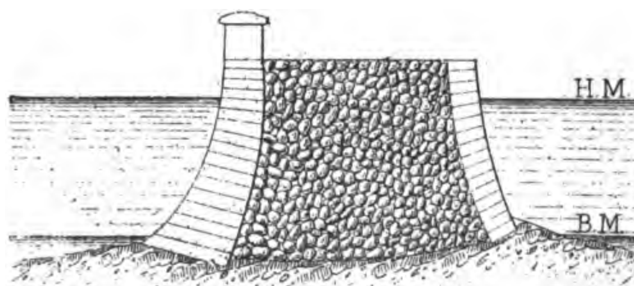


Fig. 218. — Whitehaven.

Joinville (fig. 216). **Saint-Gilles-sur-Vie** (fig. 217). *Whitehaven* (fig. 218).

Si les fondations se trouvent au-dessous du niveau de la basse mer, on les établit en béton, blocs coulés sur place ou construits à terre et

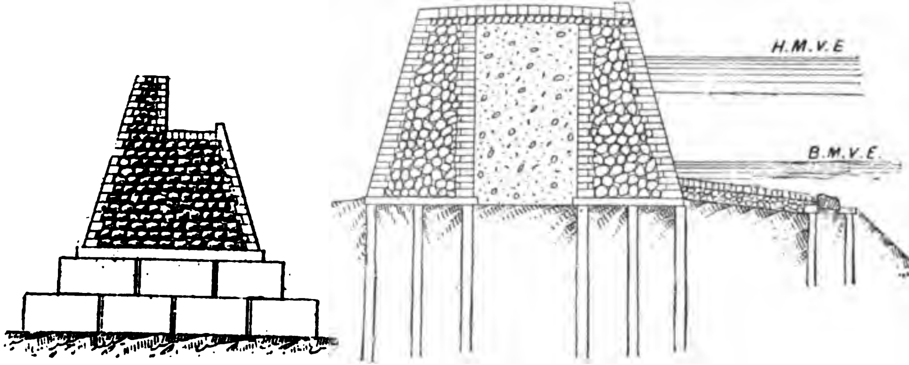


Fig. 219. — Môle Saint-Nicolas. Sables-d'Olonne. Fig. 220. — Grande jetée.

posés par l'un des procédés connus. (*Douglass*, île de Man, *môle Saint-Nicolas*, **Sables-d'Olonne**) (fig. 219). Quand le sol est sablonneux, on construit sur pilotis (*Grande Jetée*, **Sables-d'Olonne**, fig. 220)

CRIBS AMÉRICAINS

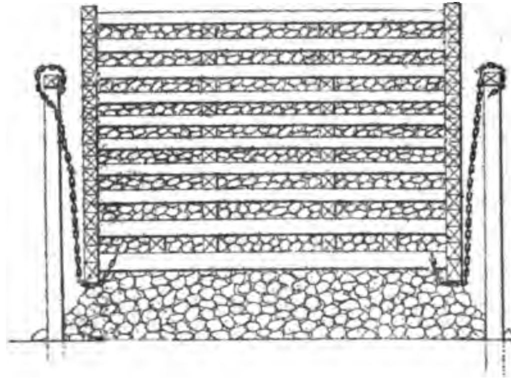
XIII. — Les cribs sont de grandes caisses de charpente (fig. 221) composées de pièces de 30 *cm* de côté, solidement assemblées et boulonnées ensemble, à claire-voie.

Deux cloisons, construites de la même façon, partagent longitudinalement la caisse en trois compartiments, recoupés eux-mêmes transversalement par d'autres cloisons, espacées en moyenne de 3 mètres environ. Souvent ils reposent sur des pilots. Ils sont amenés flottants à leur place et immergés par un lest de pierres ; ils sont protégés aussi à leur pied par des enrochements. On complète souvent leur solidité par des entretoises en charpente et aux angles par des plaques de tôle, surtout s'ils sont exposés à l'effort de la glace.

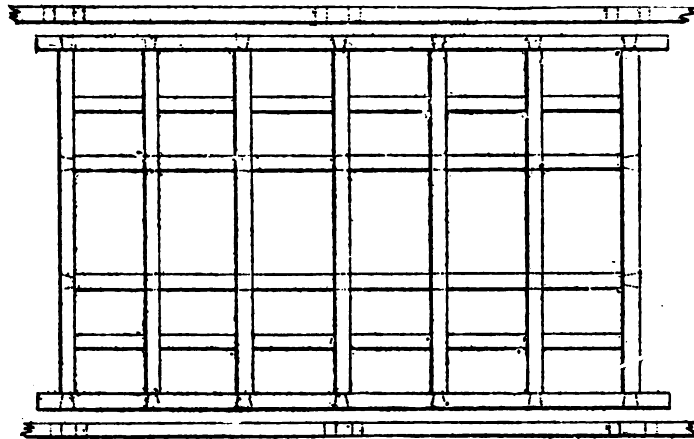
Ces cribs durant longtemps dans l'eau douce où il n'y a pas de tarets sont employés dans les grands lacs ; mais les parties émergées demandent de fréquents renouvellements ; aussi de telles constructions ne sont-elles possibles que dans les localités où le bois est à très bon marché. Elles économisent les enrochements.

Mais cet avantage ne compense pas les frais d'entretien et de renouvellement. Aussi maintenant que la période de travaux définitifs a com-

mencé pour les Etats-Unis, le système disparaîtra-t-il peu à peu. En



Coupe.



Plan.

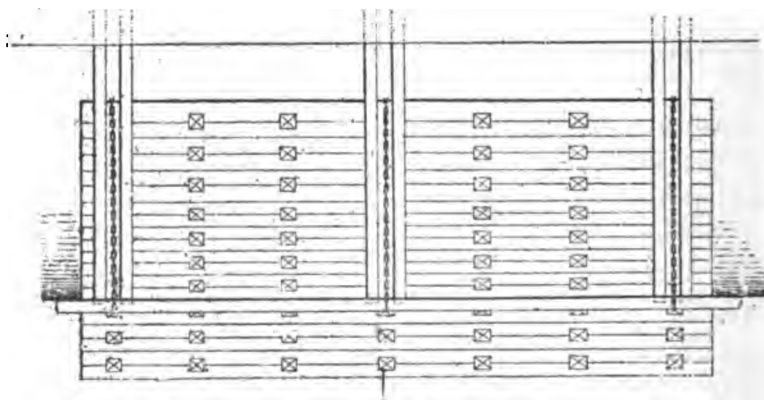


Fig. 221. — Crib de Chicago

attendant, dans les dernières installations on a combiné de différentes façons les cribs, qu'on maintient en dessous du niveau de l'eau, avec une superstructure en maçonnerie ou en béton.

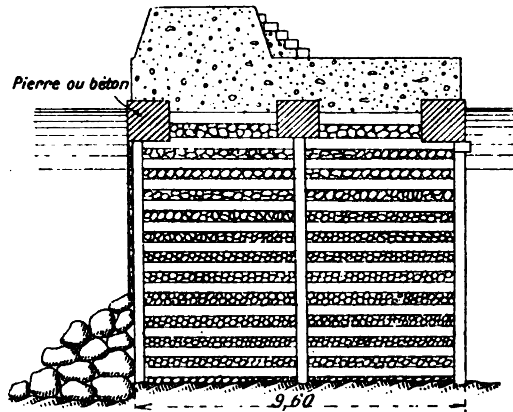


Fig. 222. — Môle de Cleveland.

Le môle de **Cleveland** (fig. 222) est un exemple de ce nouveau type. Celui de **Port Marquette** (fig. 223) offre en même temps un profil très

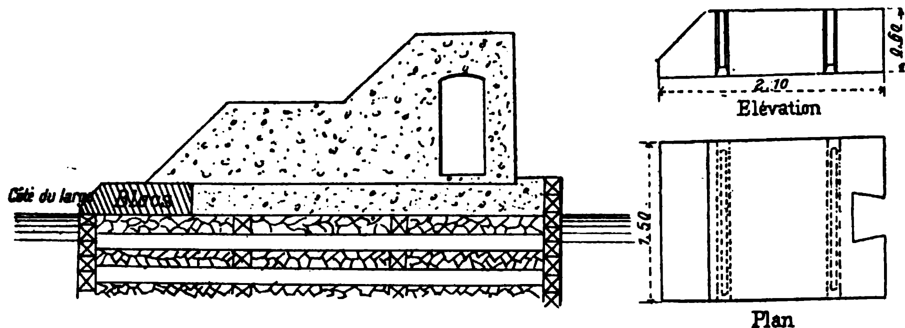


Fig. 223. — Môle de Port Marquette.

convenable pour amortir la force des vagues. Le pied de la superstructure est composé d'un bloc de béton de granite posé par une grue ordinaire et plus résistant qu'un massif qui aurait était coulé en place.

Digues flottantes. — Nous ne citons que pour mémoire les digues flottantes qui ont été essayées ou simplement proposées sans succès. A Brighton, puis à la Ciotat, on avait mouillé en mer des carcasses en bois destinées à amortir l'action des lames. Outre que le système est fort peu efficace, il offre le danger de rupture des chaînes. On y a rapidement renoncé.

M. Greenway Thomas a soumis en 1884 le projet d'une digue composée de bouées ancrées, qui auraient brisé la lame comme le font les plantes marines. Pour donner un résultat, ces bouées devraient avoir la hauteur de la zone d'action des vagues et être aussi rapprochées que le sont les algues ; il y a là une impossibilité matérielle, surtout dans les mers à marées.

Calver et Bennett Hays ont proposé, le premier un rideau de pieux vissés dans le sol et étayés, le second des persiennes placées également sur des pieux. Tous ces procédés n'offrent aucune garantie contre la violence de la mer.

MOLES EN BLOCS CREUX

Heyst (fig. 224). — La partie pleine du môle de Heyst ou Zeebrugge est établie par des fonds variant de 6,50 *m* à 8 mètres. Sa largeur, de 74 mètres, est limitée par deux rangées de blocs artificiels. L'assise

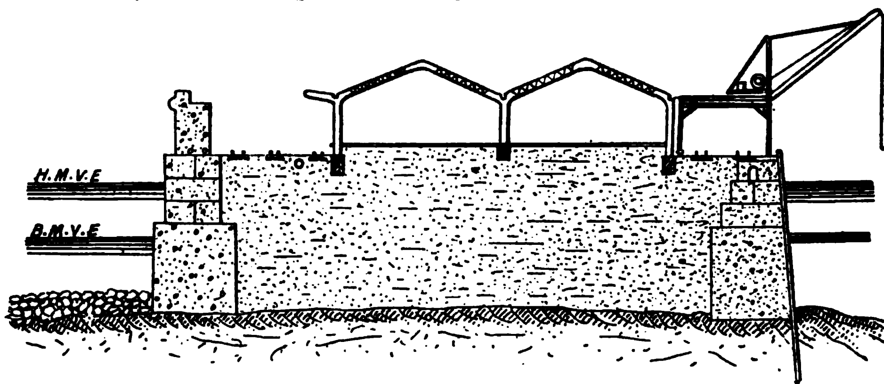


Fig. 224. — Môle de Heyst.

inférieure est formée de blocs de béton monolithes pesant 2 500 à 3 000 tonnes, longs de 25 mètres, larges de 7,50 *m* et dont la hauteur varie avec la profondeur. A l'extérieur, les blocs reposent sur le sable du fond, simplement dressé ; à l'intérieur, ils sont fondés à la cote — 8 mètres dans une cunette draguée, et même à la cote — 9,50 *m* sur 375 mètres de longueur à l'extrémité du môle, pour assurer une augmentation de tirant d'eau en cas de nécessité.

Les gros blocs s'élèvent jusqu'à la cote + 1 mètre ; au-dessus le mur est établi en blocs de 50 tonnes, il aura 5 mètres d'épaisseur et sera arasé à la cote + 7,30 *m*, cote des quais et terre-pleins. Au-dessus de ce niveau et jusqu'à la cote + 13 mètres, c'est-à-dire à

8,50 *m* au-dessus de marée haute, s'élève un mur d'abri en béton coulé sur place.

A l'extrémité, le môle n'est pas doublé d'un quai intérieur; là, les épaisseurs ci-dessus indiquées pour les murs seront portées respectivement à 9 mètres, 6,50 *m* et 4,50 *m*. Le musoir aura 16 mètres de diamètre.

Copenhague. — Les môles de Copenhague seront décrits au chapitre suivant.

MUSOIRS

Le musoir étant la partie la plus exposée des môles et celle où s'exécutent les manœuvres en cas de sinistre a besoin d'être élargi et construit plus solidement que le reste de l'ouvrage.

A Holyhead (fig. 225) il a la forme d'un marteau, afin d'empêcher les pierres de contourner l'extrémité; c'est aussi contre la branche externe que s'appuie l'enrochement. Intérieurement, il protège le quai.

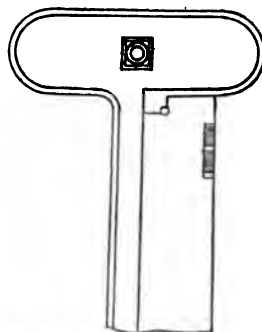


Fig. 225. — Musoir d'Holyhead

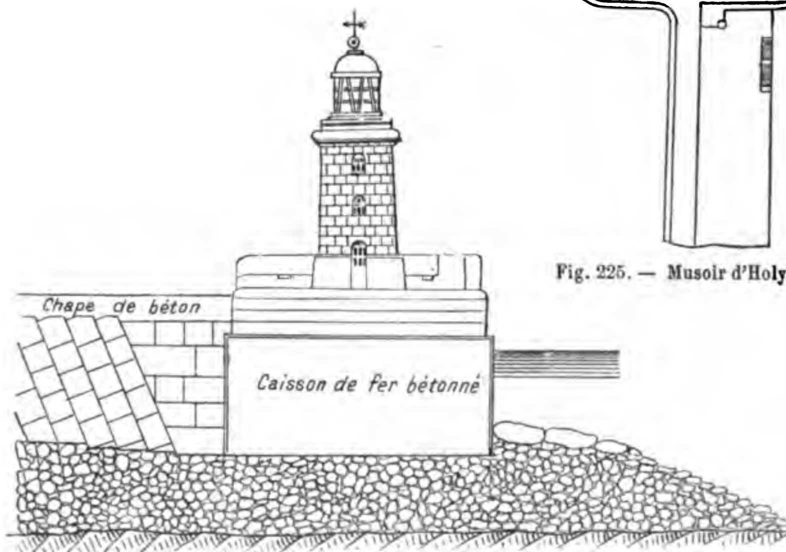


Fig. 226. — Musoir de Colombo.

Ordinairement les musoirs sont arrondis ou carrés. A *Saint-Pierre*, celui de l'épi courbe se compose d'une vieille coque de drague remplie de béton; celui de *Colombo* (fig. 226) est de même une caisse de fer pleine de béton, supportant un phare.

Libau. — La figure 227 indique le mode de construction du musoir de Libau et la figure 227 *bis* celui de la Pallice.

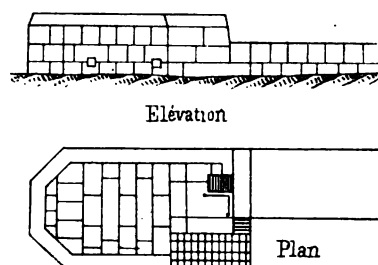


Fig. 227. — **Musoir de Libau.**

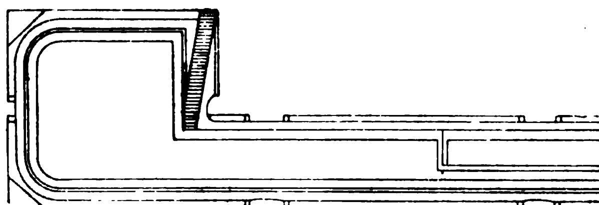


Fig. 227 *bis*. — **Musoir de la Pallice.**

Nous donnons comme exemple unique la construction des nouveaux musoirs du port de Madras :

Musoirs de Madras (fig. 228). — Les musoirs des nouveaux môles de Madras ont été construits dans des cylindres étanches en fer de 13 mètres de diamètre extérieur et 16 mètres de hauteur, dont la tôle de bordé est épaisse de 6 millimètres et est soutenue par un lattis en fer, au fond et sur les côtés. Les cylindres ou caissons sont formés d'anneaux superposés rivés ensemble. La construction fut commencée dans un petit bassin clos, tenu à sec, creusé exprès sur le rivage au fond du port ; quand la paroi atteignit 2,35 *m* de hauteur, le caisson fut mis à l'eau et l'achèvement continua dans le port, le long des môles. A mesure, on augmentait le tirant d'eau en coulant du béton entre les parois et un moule circulaire en charpente concentrique, qui ne laissait que de 1,50 *m* à 1,20 *m* d'épaisseur pour l'anneau de béton. Le caisson terminé et calant alors 11 mètres fut halé sur le substratum à 12 mètres de profondeur, amarré solidement en place par huit aussières et lesté de 500 tonnes d'eau, entrée par de grandes vannes ménagées sur les parois. On y introduisit, dans des

places aménagées pendant le coulage du béton, des blocs circulaires pesant en tout 350 tonnes ; après avoir pompé l'eau on acheva de remplir avec du béton à sec. C'est donc là un bloc de plus de 5 000 tonnes.

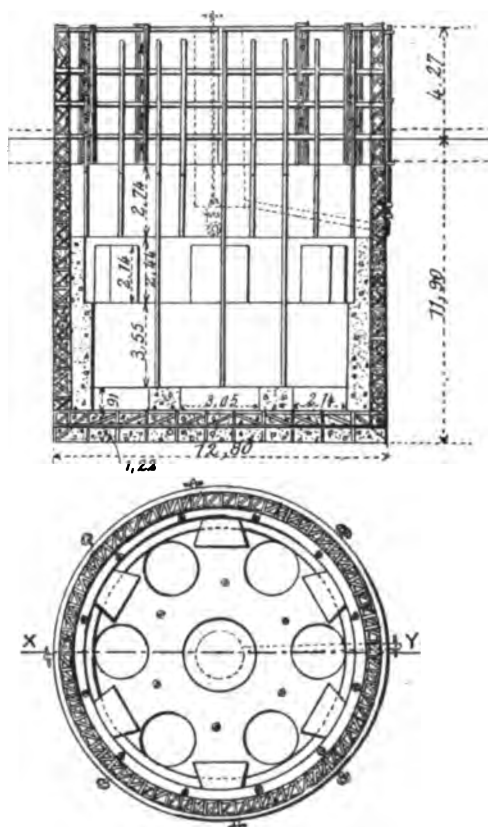


Fig. 228. — Musoir de Madras.

Au centre est ménagé au moyen d'un tuyau noyé dans le béton un puits qui sert au marégraphe. D'autres tuyaux de plus petit diamètre au nombre de 18 ont été employés à envoyer à l'enrochement inférieur un coulis de ciment pour le transformer en maçonnerie. La pose et le maintien de ces tuyaux, rivés sur le fond, ont été l'une des principales difficultés de l'entreprise, qui a d'ailleurs parfaitement réussi, malgré les risques considérables qu'elle comportait.

COMPARAISON DES DIVERS SYSTÈMES

La multiplicité des types des ouvrages de protection, leurs combinaisons dans les mains des mêmes ingénieurs, prouvent qu'il n'est aucun

d'eux auquel on puisse attribuer une supériorité absolue. Le choix du système, les innovations dépendent de la localité, de la profondeur, du fond, de l'exposition, etc., mais aussi des matériaux que l'on peut se procurer. Souvent même c'est là l'élément déterminant, c'est ce qu'on a vu pour Port-Saïd et Ijmuiden.

Les enrochements simplement en pierres perdues jetés pêle-mêle semblent être complètement abandonnés; pour les ouvrages exposés, du moins en Europe, on ne recommencerait certainement pas les colossales entreprises de Cherbourg, Portland et Plymouth; mais pour de petits ouvrages et dans les localités bien abritées, ils sont encore employés et avec avantage. L'enrochement en pierres perdues, arrêté à quelques mètres au-dessous du niveau de basse mer, est presque toujours d'ailleurs la base de la plupart des travaux.

En France, le type de Marseille est encore le plus communément appliqué, et il a été imité dans un grand nombre de ports, surtout de la Méditerranée. C'est un type logique, peu coûteux, dans lequel les enrochements sont employés sur une vaste échelle, tout en étant bien protégés.

Le couronnement du substratum doit être assez large pour laisser une berme à la base de la superstructure. Si l'ouvrage n'est destiné qu'à protéger une rade, comme à Cette, il s'élève peu au-dessus du niveau de la mer et une protection en blocs horizontaux donne alors de bons résultats. Le type de Marseille a été récemment employé à Boulogne avec cette précaution. En Italie, le système a été modifié par la pose des blocs de protection en assises régulières qui partent du fond même de la mer. Deux accidents, ceux du *Frangiflutti* de la Vegliaia à Livourne en janvier 1895 et du môle de Gênes en décembre 1898, sont de nature à ébranler la confiance dans le procédé italien; mais ils nous semblent démontrer seulement que le principe de la construction n'a pas été bien observé dans ces deux applications, critique qu'on peut faire également pour le môle de Philippeville, au regard du type de Marseille. A la Vegliaia, le mur est trop droit et la protection mutuelle des blocs n'était pas complète.

Quand la mer est violente, le type de Marseille pas plus que la variante italienne ne peuvent être appliqués; les enrochements s'arrêtent à la limite d'action des vagues, et la partie supérieure est toute construite en blocs artificiels pêle-mêle, surmontés ou non d'une superstructure (Alger, Port-Erin, Port-Saïd, Livourne, Saint-Jean-de-Luz, etc.).

Le système d'enrochements intérieurs, pratiqué à Alexandrie, procure alors une certaine économie.

Le rapport du vide au plein dans ce système étant considérable, les vagues passent facilement au travers des blocs ; ce serait un grave inconvénient si les navires devaient accoster le long de l'ouvrage de protection.

Les Anglais, qui ont été des derniers à employer le béton, semblent vouloir au contraire maintenant demander à ce genre de matériaux tout ce qu'il peut donner. Pour eux, le type actuel de l'ouvrage de protection, c'est le substratum d'enrochements surmonté d'un mur en blocs ; ceux-ci peuvent être arrimés horizontalement ou par assises inclinées (Manora, Madras, Mormugaò, etc.). Le principe de ce procédé est de laisser les colonnes de blocs indépendantes les unes des autres, de façon qu'elles puissent subir les tassements sans compromettre la stabilité générale. A Madras, la portion extérieure des deux môles, celle qui était frappée directement par la vague, a été emportée. Les blocs n'étaient pas assez lourds et l'épaisseur du mur était insuffisante ; le principe lui-même n'a rien perdu de sa valeur à cet échec.

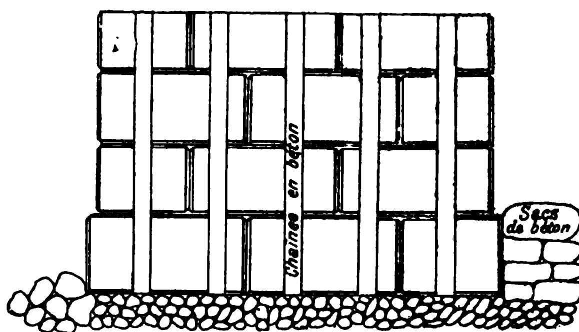


Fig. 229. — Liaison des blocs à Colombo.

Mais l'accident de Madras a déterminé chez les Anglais une tendance à relier les blocs soit par des crampons en fer, soit au moyen de tenons et mortaises, comme à Colombo, où, non seulement, les blocs sont posés avec des tenons, mais sont encore reliés ensemble verticalement par des clavettes en béton coulé en sacs et damé dans des rainures verticales à section en queue d'aronde (fig. 229). Chacune des assises comporte cinq de ces clefs, distantes de deux mètres.

A Mormugaò, en outre de clefs semblables posées dans les assises supérieures, les blocs sont munis de véritables tenons encastrés dans

des mortaises correspondantes. Les modes de liaisons varient de plusieurs façons. Aux môles de la Tyne, on a disposé, au milieu des blocs ordinaires, d'autres dits « blocs pianos », destinés à prévenir le glissement sous l'effort des lames (fig. 230).

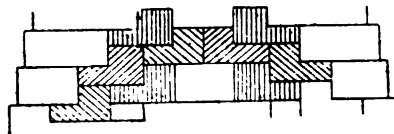


Fig. 230. — Blocs pianos aux môles de la Tyne.

Ce n'est pas là un progrès, au contraire, partout où la superstructure repose sur un fond mobile ou sur des enrochements toujours sujets aux tassements ou à des déplacements par les vagues. Il se produit ainsi des cavités et à un moment donné les crampons de fer aussi bien que les tenons en béton peuvent se briser; les blocs tombent dans les vides et se fragmentent. Indépendants ils auraient peu à peu comblé les trous et les réparations nécessaires auraient été reportées à la surface.

La complication de la pose des blocs pianos de Tynemouth est loin d'être compensée par la liaison obtenue par ce procédé.

L'application d'une chape continue de béton a les mêmes inconvénients; il vaut mieux la fractionner en sections qui, tout en étant assez longues pour la résistance, peuvent se mouvoir indépendamment les unes des autres.

C'est là l'avantage du système de Wicklow; mais il faut de grandes précautions pour employer le béton de Portland dans les conditions où on l'a appliqué dans ce port. Certes, la prudence est parfois poussée trop loin dans ce sens, puisqu'en France on peut dire que l'emploi du béton de Portland coulé sous l'eau est presque inconnu; nous avons construit, à plusieurs mètres de profondeur, avec les précautions de vidange voulues, des massifs de ciment de Portland qui sont devenus de véritables monolithes.

Mais encore faut-il que le dépôt ait lieu dans une eau tranquille. Alors le délavage est presque nul, et cependant la laitance, enlevée par la légère agitation qui se manifeste toujours, n'a pas d'inconvénient. Il y a lieu, si des affouillements se produisent le long du môle, de le protéger par des enrochements.

Le système des sacs-blocs est simple mais est sujet à plusieurs critiques. La mise en place par les chalands n'est pas très sûre ; le bloc jeté dans une mer profonde n'occupe certainement pas la place voulue ; d'ailleurs immergé frais il peut se briser, ce qui arrive souvent. Si la fabrication du béton est mauvaise on ne s'en aperçoit pas et l'on ne saurait, en tout cas, retirer le sac. La surface n'est pas soignée, condition cependant importante.

Les blocs-sacs demandent une composition riche en mortier ; ils doivent n'être lâchés qu'à une faible distance du lit de pose, pour éviter le délavement. M. Shield a eu à inspecter un ouvrage exécuté par des blocs de ce système tombant d'un chaland à clapets ; il présentait l'aspect d'un banc de galets.

Il est juste de dire pourtant que la toile des sacs, surtout si elle est double, prévient beaucoup le délavage.

Toutes les critiques adressées au système de Wicklow s'appliquent au coulage du béton en masse, qui offre par ailleurs les mêmes avantages. Le béton coulé directement sous l'eau offre-t-il les mêmes conditions de durée que celui qui a séché et durci à l'air avant l'immersion ? On ne pourra en être certain qu'après un laps suffisant d'années.

Les procédés de M. Kinipple qui seront décrits au chapitre suivant, ont réussi entre les mains de cet ingénieur distingué, mais n'ont été appliqués par aucun autre. La pose du béton après un commencement de prise nous semble dangereuse. Quant à l'injection du ciment sous l'eau au milieu d'enrochements, c'est un système qui a donné des résultats satisfaisants pour réparer des avaries, quand on ne pouvait faire autrement, mais qui ne constitue pas encore un procédé de construction à appliquer à des ouvrages importants.

En résumé, suivant les circonstances on pourra employer l'un des procédés décrits ; mais dans les mers violentes, celui des assises de blocs inclinés nous semble préférable.

STABILITÉ DES OUVRAGES EN MAÇONNERIE

Elle pourrait à la rigueur se calculer par les formules ordinaires, en admettant que la pression P des vagues par mètre carré soit uniforme sur toute la hauteur H. Elle tend à renverser l'ouvrage autour de l'arête B et aussi à le faire glisser sur la base AB.

Renversement.— Sur un mètre courant de la maçonnerie, le moment du renversement est :

$$P\,(H + h)\,\frac{(H + h)}{2} = P\,\frac{(H + h)^2}{2}$$

Il y a lieu de distinguer le cas où la maçonnerie serait simplement posée comme un bloc sur la fondation et celui où elle lui serait reliée par du mortier. Dans le premier, la stabilité ne dépend que du poids; dans le second, il faut compter la résistance du mortier à la traction, résistance parfois plus grande que le poids.

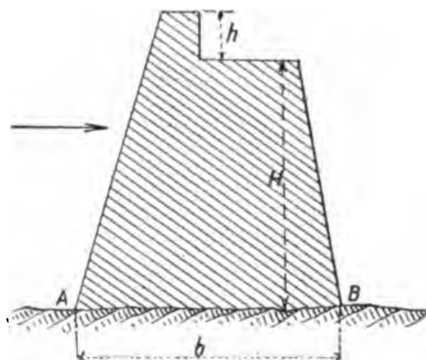


Fig. 231. — Stabilité des môles.

Soient S (fig. 231) la section droite du mur et par conséquent aussi le volume d'un mètre courant,

d le poids d'un mètre cube du mur,

b la base.

Le moment du poids par rapport à l'arête B est :

$$\frac{Sdb}{2}$$

En admettant que la résistance du mortier à l'enrochement est de 50 000 kilogrammes par mètre carré, le moment de la résistance de la base par mètre courant par rapport à B est :

$$50\,000\,b \times \frac{b}{2}$$

Pour la stabilité, on doit donc avoir :

$$\frac{b}{2}\,[Sd + 5\,0000\,b] > \frac{P\,(H + h)^2}{2}$$

Pour simplifier, on peut admettre $S = bH$, la surface du parapet faisant compensation à la perte éprouvée par suite du fruit, toujours faible.

Il vient :

$$\frac{b}{2}(b\,\mathrm{H}d + 50\,000\,b) > \frac{\mathrm{P}\,(\mathrm{H}+h)^2}{2}$$

D'où :

$$b > \sqrt{\frac{\mathrm{P}\,(\mathrm{H}+h)^2}{\mathrm{H}d + 50\,000}}$$

On se donne H et h qui dépendent des conditions locales. En supposant :

$\mathrm{P} = 30\,000\ Kg \qquad d = 2\,400\ Kg \qquad \mathrm{H} = 6\ m \qquad h = 1{,}50\ m$

la formule donne :

$$b = 5\ m$$

Glissement.— En admettant 0,70 comme coefficient de frottement, on écrit que la pression P (H + h) agissant sur un mètre de longueur doit être inférieure au frottement 0,70 Sb et à l'adhérence du mortier 50 000 b.

$$0{,}70\ \mathrm{S}d + 50\,000\,b > \mathrm{P}\,(\mathrm{H}+h).$$

ou comme plus haut :

$$0{,}70\,b\,\mathrm{H}d + 50\,000\,b > \mathrm{P}\,(\mathrm{H}+h)$$

D'où :

$$b > \frac{\mathrm{P}\,(\mathrm{H}+h)}{0{,}70\ \mathrm{H}d + 50\,000}$$

Les mêmes nombres que ci-dessus donnent :

$$b > 4{,}50\ m$$

On prendra, suivant les cas, la plus grande des deux valeurs.

Pour une maçonnerie non reliée à la fondation, la résistance à la rotation est exprimée par :

$$b^2\,\mathrm{H}d > \mathrm{P}\,(\mathrm{H}+h)^2$$

et pour la résistance au glissement :

$$0{,}70\,b\,\mathrm{H}d > \mathrm{P}\,(\mathrm{H}+h)$$

formules qui avec les nombres précédents donnent :

$$b > 10{,}80\ m$$

et

$$b > 15{,}60\ m$$

Si le mur est relié à la fondation ou porte complètement sur le fond, il n'y a pas lieu de tenir compte de la sous-pression ; au cas contraire, il faut retrancher du poids de la maçonnerie celui du liquide

déplacé. La formule donnerait alors des dimensions exagérées; aussi n'est-ce pas par des calculs, mais par la comparaison avec des ouvrages similaires qu'on détermine les dimensions d'un mur d'abri.

Tassement — Les enrochements ou blocs versés à la mer sur un fond meuble éprouvent toujours un tassement qui diminue leur hauteur. Le tassement est à peu près inoffensif tant qu'il ne dépasse pas le quinzième de la hauteur de l'ouvrage à moins que celui-ci ne soit très élevé: ainsi à Alderney, cette proportion a entraîné un déplacement vertical de 2 mètres, qui a occasionné de graves avaries.

A Colombo, le tassement s'est élevé au dixième et à Mormugaò au huitième de leur hauteur; mais dans ces deux cas, la superstructure a suivi l'affaissement de l'enrochement inférieur assez exactement pour qu'il n'en soit résulté aucun dommage sérieux.

A Manora, le tassement a atteint près d'un mètre surtout du côté de la mer, vers laquelle l'ouvrage penche par suite un peu. Néanmoins, les blocs, disposés en deux rangées, ne se sont pas écartés.

Il est bon de prévoir un tassement de 10 à 12 °/₀ et de surcharger en conséquence les enrochements. En Amérique, au nouvel ouvrage de la Delaware, l'enfouissement des blocs dans le sol a été prévenu en grande partie par l'interposition de matelas de fascines.

Le tassement des matériaux de petit volume se fait plus rapidement et plus également que celui des gros blocs; aussi quand sur un enrochement on édifie une superstructure est-il bon de laisser du côté de la mer une berme assez large; on évite ainsi de fonder sur les blocs qui protègent le talus extérieur. Cette disposition a encore l'avantage de ne laisser frapper le mur que par les vagues déjà brisées sur l'enrochement.

COMPOSITION ET DIMENSIONS DES BLOCS ARTIFICIELS

En Angleterre, les blocs artificiels se composent en général de béton de cailloux plus ou moins mélangés de moellons; en France, on les construit de préférence en maçonnerie; ils sont un peu plus coûteux, mais plus résistants et plus durables; des expériences faites à Libau tendraient à démontrer que leur résistance est triple de celle des blocs en béton. Cependant, tandis que dans le port militaire on emploie ceux de maçonnerie, c'est le contraire au port de commerce.

Les dimensions doivent être aussi grandes que possible. La poussée des vagues, en effet, s'exerce sur la surface, proportionnelle au carré des côtés, tandis que la résistance est due au poids, proportionnel à leur cube. Il est donc toujours possible d'arriver à rendre la résistance supérieure à la poussée. Les blocs affectent la forme d'un parallélipipède rectangle dont les côtés sont proportionnels aux nombres 4, 6, 9. En appelant x le plus petit côté, la surface de la face minima est $\frac{3}{2}x^2$; le volume est $\frac{27}{8}x^3$.

L'effort exercé par les vagues sur la face minima, qui est en général celle de parement, peut atteindre $\frac{3}{2}x^2 \times 30\,000$ et tend à faire glisser le bloc sur sa base. La résistance provient du poids affecté d'un coefficient de frottement qu'on compte égal au maximum à 0,70 ; mais il s'augmente sans doute des grippements dus à l'irrégularité des surfaces, et nous le porterons à 1. Le poids du mètre cube du bloc est au maximum de 2 500 kilogrammes dont plus de 1 000 se perdent dans l'eau. La stabilité est assurée au cas où

$$\frac{3}{2}x^2 + 30\,000 > \frac{27}{8}x^3 \times 1500.$$

D'où $x > 8{,}80\,m$. Les deux autres côtés seraient 13,20 m et 19,80 m; le volume 2 300 mètres cubes.

En pratique, bien qu'il soit prudent de se souvenir des avaries de Wick, il faut aussi remarquer : 1° que la force des lames n'atteint son maximum qu'au niveau de la haute mer ; le calcul précédent ne concernerait donc qu'une faible partie des blocs employés ; 2° que l'effort de 30 tonnes est exceptionnel ; 3° que les blocs s'appuient mutuellement, sauf à la rangée supérieure, mais que là encore ils s'enchevêtrent et se coincent en exerçant les uns sur les autres des réactions ; 4° que sans doute dans les vagues comme dans les courants aériens les pressions extraordinaires ne se rencontrent que dans des filets très limités, dont l'action ne se fait sentir que sur une partie seulement de la surface d'un bloc. Il est même rationnel d'admettre que le fait est encore plus vrai pour la vague, brisée irrégulièrement par les obstacles qu'elle rencontre, soit sur le fond, soit sur le talus du môle, que pour le vent qui ne rencontre guère d'obstacles.

Ces calculs ne donnent donc que des idées générales, et il faudrait

se garder de les appliquer à la lettre. Voici un exemple de l'erreur à laquelle on s'expose. Souvent l'arasement supérieur des blocs est protégé par une chape en maçonnerie, dont la largeur ne peut dépasser celle de ce couronnement. Soient l cette largeur et h l'épaisseur de la chape. Par mètre courant, l'équation de la résistance au glissement, toujours pour le coefficient de frottement égal à l'unité et d étant le poids spécifique du bloc est

$$30\,000\,h < lhd.$$

h s'élimine, ce qui voudrait dire que la hauteur de la chape est indifférente à la stabilité, conséquence inadmissible.

En pratique, il faut donc employer les plus gros blocs, d'autant qu'il est constant que la mer en remue de 200 tonnes; mais l'expérience indique que dans un ouvrage où les diverses parties s'appuient d'une façon rationnelle, le volume de 50 mètres cubes peut être considéré comme offrant toute sécurité. Les blocs n'arrivent même guère à de telles dimensions, car le maniement de ces lourdes masses est difficile, coûteux et ne se justifie que dans les très grands travaux. L'unique exemple d'un môle de peu d'importance construit avec de gros blocs est celui d'Arland, où a été utilisé le chaland spécial de Brest.

Remarquons que les pierres capables de donner un béton pesant 2 500 kilogrammes au mètre cube pèseraient elles-mêmes au moins 3 000 kilogrammes. En les employant en blocs naturels, s'il était possible de leur donner des formes assez régulières, l'équation ci-dessus montre que leur volume ne devrait être que de 970 mètres cubes au lieu de 2 300 ; la différence met en lumière la supériorité des blocs naturels sur les factices au point de vue de la résistance théorique ; mais les derniers, aux formes régulières, s'arriment facilement et se soutiennent mutuellement. Les joints entre eux sont moins larges et par conséquent moins exposés. Il est bon même de boucher complètement ceux des assises supérieures qui sont hors de l'eau et qu'on peut atteindre.

DIMENSIONS DES BLOCS DE DIVERS OUVRAGES

	Longueur	Largeur	Hauteur
Pointe des Galets (blocs de couronnement)	4m,40 et 5 m.	3m,60	2m,
Dublin	9,45	6	3,05
Manora	3,60	2,40	1,35
Marseille.	3,40	2	1,50

	Longueur	Largeur	Hauteur
	—	—	—
Port-Saïd	3,40	2,50	1
Artha	4	2,50	2
Fort Chavagnac	4	2,50	2
Brest	4,60, 4,70 et 5	3,3 et 2,50	3
Colombo	4	2	1,67
La Luz	3	2,50	1,60
Leixoes	4	2,50	2
Boulogne	4	2	1,75
Ijmuiden	2	1,50	1,50
	3	1,50	2
Napier	3,30	1,60	1,70
Mormugaô	5,20	2,45	1,40
	4	2,45	1,40

Construction. — Les blocs artificiels en maçonnerie sont fabriqués par les maçons sur une aire plane, comme toute maçonnerie ordinaire. Les parements sont bien dressés et les moellons qui les composent doivent s'encastrer fortement dans le mortier et dans le reste de l'ouvrage.

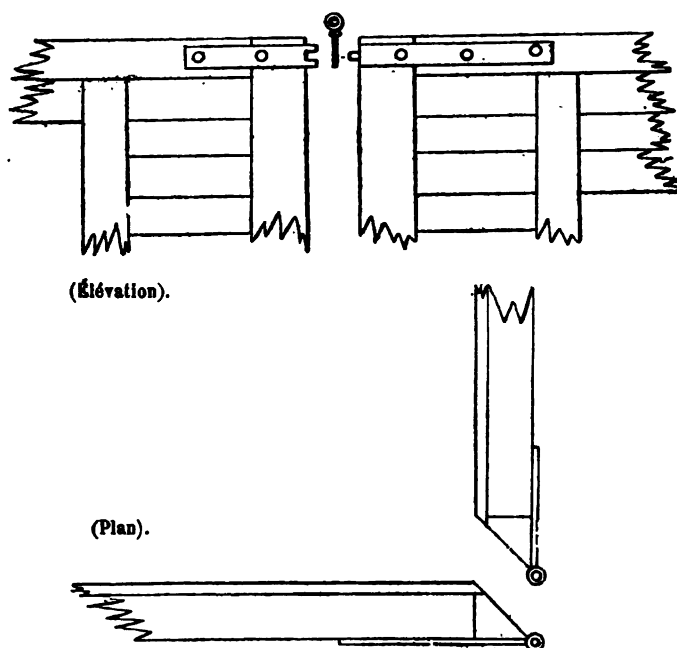


Fig. 222. — Moules des blocs.

Caisses. — Les blocs en bétons sont construits dans des formes composées de panneaux en charpente. Les panneaux sont formés par

quatre pièces verticales dont deux constituent les sablières et les autres les poteaux d'angle. Des montants en nombre suffisant relient ces pièces entre elles; à l'intérieur est cloué un bordé jointif de fortes planches en sapin. Les pièces de la carcasse se font en bois dur d'un équarrissage de 20 sur 15 centimètres pour des blocs de 3 à 4 mètres de longueur.

Les poteaux d'angle et les extrémités des sablières sont coupés à 45° de façon que les panneaux puissent se réunir (fig. 232); ils sont assemblés par des broches passant dans des œillets en fer; le démoulage s'opère ainsi aisément.

Les caisses sont posées également sur une aire bien dressée ; le béton est vigoureusement tassé en plaçant des pièces de bois aux endroits voulus pour ménager les rigoles ou les cheminées destinées au soulèvement des blocs.

On démoule après deux ou trois jours, mais le séchage dure deux mois au moins, trois si le bloc atteint 100 tonnes (Pointe des Galets); dans les pays chauds il faut arroser fréquemment et recouvrir de paille pour éviter les gerçures.

COMPOSITION DES BLOCS DE DIVERS OUVRAGES

	Ciment	Sable	Cailloux	Moellons
	—	—	—	—
Ijmuiden	1	3	5	»
Manora	1	4	5 3/4	3 1/4
Madras	1	2	5	2 1/4
Colombo	1	2	6	»
Pointe des Galets	168k,5	368 lit.	853 lit.	»

Généralement les Anglais estiment seulement les poids relatifs de ciment d'une part, du sable et des cailloux de l'autre. Ainsi ils comptent que le béton de Colombo est à 1 contre 8. D'ordinaire la quantité de sable est le double de celle du ciment.

AVARIES AUX MOLES

Les môles ont presque tous subi des avaries produites par les effets des vagues. Quelques-uns, comme Alderney, ont dû être abandonnés au moins en partie. On a déjà signalé la lutte incessante soutenue à Cherbourg; les grands ouvrages anglais en enrochements, Portland, Plymouth, etc., nécessitent un continuel entretien.

Les môles en maçonnerie, ou en blocs artificiels, sont soumis également à des dégradations. Ainsi ceux de Gênes, de la Vegliaia, après leur achèvement, ceux d'Oran, de Philippeville, pendant leur construction.

Voici encore quelques exemples :

Aberdeen (fig. 233). — Le môle sud d'Aberdeen est exposé à toute l'action des tempêtes du NE. Dans la portion non protégée par les sacs de 100 tonnes (page 344), les petits sacs de béton ont été minés par les vagues et les blocs de béton ont été arrachés et essaimés devant les cavernes produites par leur chute et sur lesquelles la chape de béton formait un linteau qui se fendit lui-même.

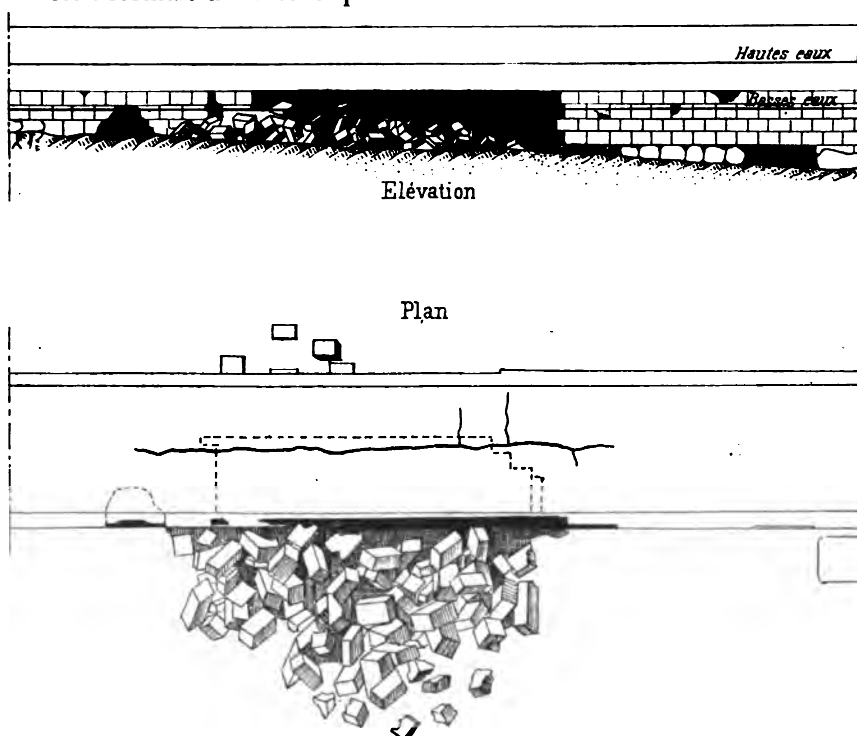


Fig. 233. — Avaries du môle sud d'Aberdeen.

La vague en pénétrant dans les excavations frappait les blocs du parement intérieur et les précipitait dans l'avant-port. Cet effet était augmenté par la sous-pression provenant de l'air accumulé par les lames dans les trous formés au milieu de la maçonnerie par les vides restés après la destruction des pilotis par les tarets.

Les avaries ont été réparées par du béton coulé en place et protégé par une ceinture de blocs-sacs de 50 tonnes.

Manora. — A l'origine, pendant les tempêtes, quelques blocs de la rangée intérieure et supérieure ont été projetés dans le chenal par la force des vagues agissant entre les joints (fig. 234); ils furent remplacés par du béton coulé en place.

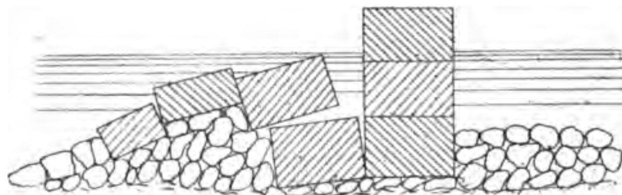


Fig. 234. — Avaries à Manora.

A Ijmuiden, les blocs ont beaucoup souffert, sans doute à cause d'un dosage trop maigre de ciment; ceux surtout des protections latérales se sont brisés. Ils sont remplacés au fur et à mesure par d'autres en briques cassées et cailloux, avec une partie de ciment contre quatre (2 ciment, 3 sable, 3 briques cassées et 2 cailloux). On a également employé des blocs naturels.

A Fraserburgh (fig. 235), la partie du môle composée de blocs-sacs a été complètement avariée ; cet accident est dû à la faible proportion de ciment (1 sur 9 parties) qui entrait dans le béton. Au-dessus de 1 sur 6 la cohésion n'est pas suffisante pour résister aux attaques des lames.

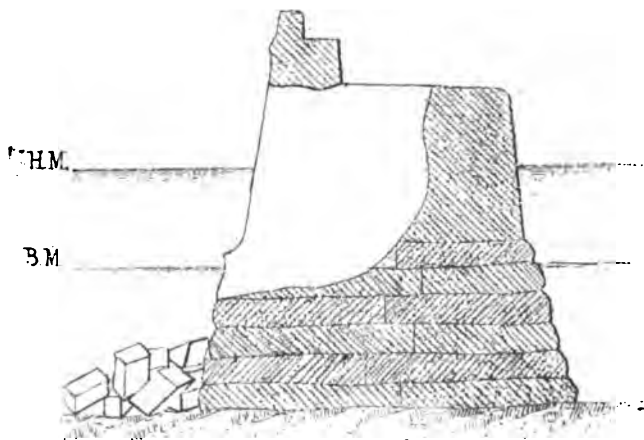


Fig. 235. — Fraserburgh.

Le temps après lequel se manifeste la détérioration du béton dans l'eau de mer est parfois considérable. A la Joliette, Marseille, elle n'a été observée qu'au bout de 23 ans; on a pensé que la projection de l'eau

contre les quais par les propulseurs des bâtiments pouvait avoir contribué à ce résultat.

A Cherbourg, c'est après 13 ans que des blocs au ciment de Portland mélangé de ciment de Medina ont été désagrégés.

Le trass de Hollande est parfois employé en France; et la pouzzolane de Santorin donne d'excellents résultats. Le béton fabriqué avec ce mortier peut, après 24 heures, être projeté au fond de l'eau à une profondeur de 8 mètres sans que la prise en soit compromise.

Les avaries arrivent parfois aux môles après un très long temps; ainsi au Cap de Bonne-Espérance, les talus des enrochements n'avaient pas varié depuis 1865, quand ils ont été remaniés et très aplatis en 1889.

A Port-Erin (île de Man) le môle du type de blocs jetés pêle-mêle sur enrochements a eu sa superstructure détruite après treize années, tandis qu'elle n'avait jamais été remuée jusque-là.

On sait que c'est en 1877, longtemps après l'achèvement des travaux, que 300 mètres du parapet de Douvres ont été détruits par la vague.

Les ouvrages à la mer doivent donc être entretenus avec le plus grand soin, et toute dégradation sera réparée immédiatement, car autrement l'importance en augmente rapidement.

CHAPITRE XIX

CONSTRUCTION DES OUVRAGES DE PROTECTION

Le mode de construction des môles et digues varie suivant l'importance de l'ouvrage, la nature du fond où ils sont établis, la profondeur, l'exposition de la localité, la présence d'un abri, la proximité des carrières, les matériaux employés, etc. Les divers systèmes déjà usités ne peuvent donc être que des indications dont il sera tenu compte suivant les conditions spéciales du travail entrepris.

ENROCHEMENTS

Pour les môles, les enrochements de peu d'importance sont transportés par des tombereaux ou des chariots à bascule et jetés à la main. Dans les travaux plus considérables, on installe sur l'ouvrage lui-même, à mesure de l'avancement, des rails destinés à la circulation de wagons ou wagonnets ; les petites voies portatives suffisent souvent.

L'avancement par ce système est assez lent, car il n'est effectué que par le wagon du bout, les autres ne faisant qu'élargir le môle en vidant sur les côtés.

Une partie du môle Carnot a été ainsi construite. Egalement ceux de Kingstown et de la Tees.

Le couronnement de l'ouvrage doit être assez élevé, afin de mettre les rails à l'abri des paquets de mer. Malgré cette précaution, les voies sont souvent déplacées et les réparations exigent une main-d'œuvre considérable.

Echafaudages. — Afin d'accélérer le travail, on construit des échafaudages provisoires portant les voies ferrées.

Holyhead (fig. 236). — Le pont de service, prolongé à mesure des besoins, donnait passage à cinq voies parallèles, distantes de 10 mètres. La plateforme, large de 45 mètres avec les trottoirs, était supportée

par des palées, également espacées de 10 mètres, distance à des-

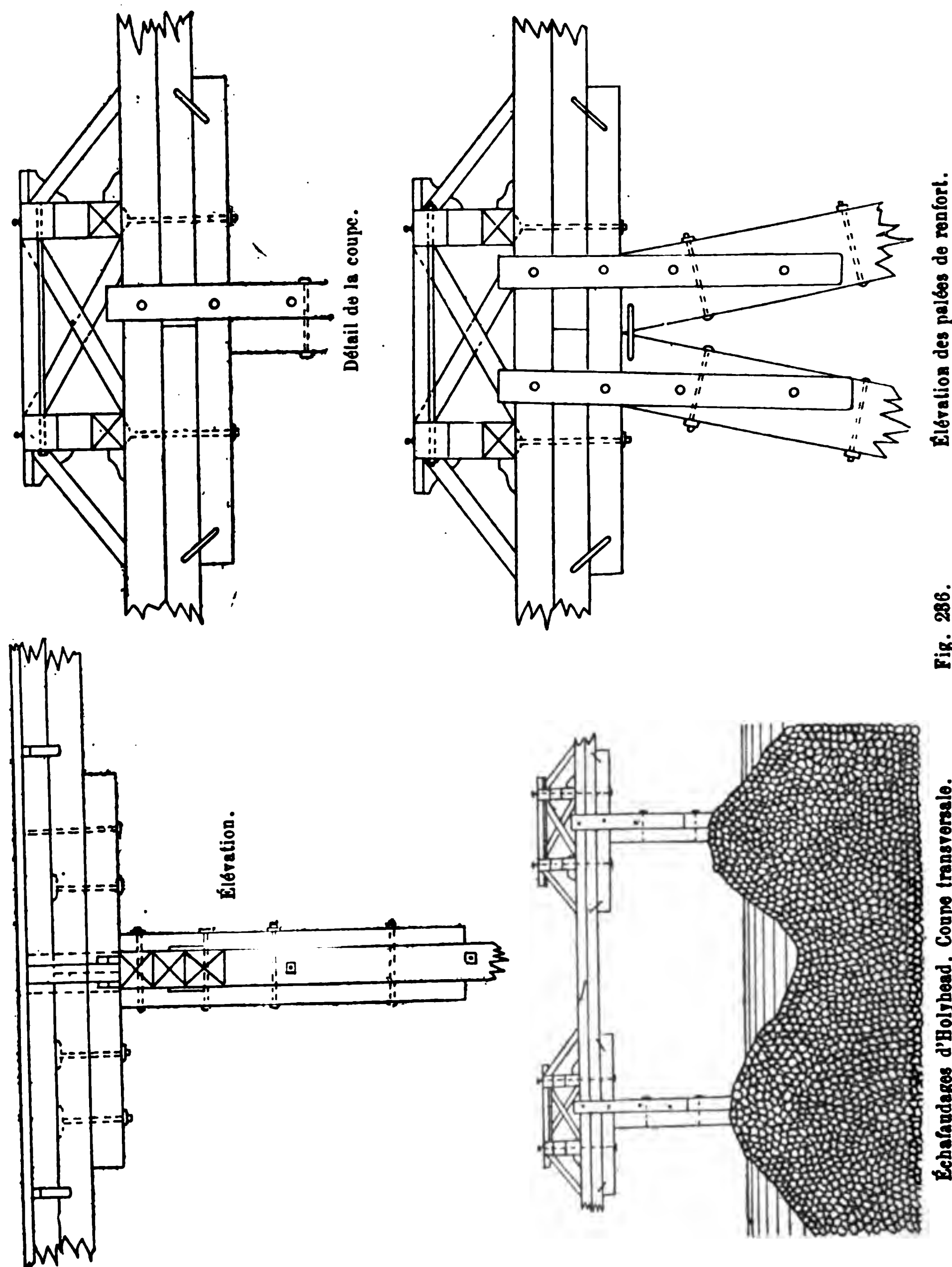


Fig. 286. Échafaudages d'Holyhead. Coupe transversale.

sein considérable afin de ne pas interrompre le passage des vagues. Les palées étaient composées de cinq poteaux placés sous l'axe des

voies, formés de deux pièces de 35 *cm* d'équarrissage et posés les uns verticaux, les autres inclinés en bigues.

Les poteaux s'appuyaient simplement sur le fond, maintenus par des enrochements projetés du pont. La mise en place d'une nouvelle palée s'effectuait par cinq grues mobiles sur les voies ferrées et portant chacune un pieu maintenu vertical par le lestage de leur base où une caisse spéciale était remplie de galets (fig. 237); une fois en position, il était entouré de pierres. Le chapeau et les autres pièces étant alors mis en place, la voie ferrée se continuait. Les enrochements étaient projetés par des wagons à bascule, tout un train se déchargeant en même temps; la mer répartissait les matériaux suivant un talus stable.

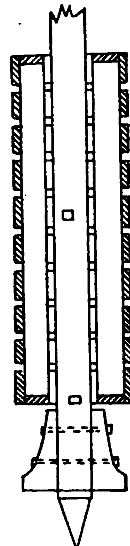


Fig. 237. Lestage du pied des poteaux.

La production journalière a atteint jusqu'à 5 220 tonnes, avec moyenne annuelle de 715 000 tonnes et poids total de 7 millions de tonnes. L'avancement maximum fut de 1 200 mètres en 1854.

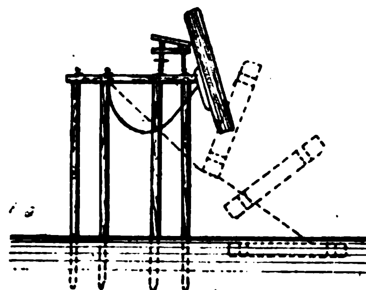
Douglass. — Le tablier était établi à la hauteur du couronnement du môle déjà construit, de sorte que la voie ferrée s'y continuait de niveau. Il était ainsi possible de démolir les tronçons de l'échafaudage à mesure de la construction et de les reporter en avant; il en est résulté une notable économie.

Rivière Columbia (fig. 238). — La plupart des ouvrages établis par les Américains sur les côtes du Pacifique sont construits au moyen d'échafaudages très simples. La jetée de la Rivière Columbia peut être décrite comme type. Les palées ne se composent que de quatre pieux verticaux, les deux extrêmes étant espacés de 5,40 *m*. Ils sont réunis par une traverse portant à 7,25 *m* au-dessus de l'eau deux voies ferrées de 91 *cm* espacées de 3,90 *m*. Sur l'ensemble des voies roule un châssis en charpente de 5,20 *m* de longueur et 5,80 *m* de largeur, porté par quatre trucs à huit roues chacun. Sur ce châssis tourne le long d'une voie circulaire de 4,80 *m* de diamètre, par l'intermédiaire de 48 galets en acier, une plateforme de 20 mètres de longueur soutenue par des étais et portant d'un côté une sonnette, de l'autre comme contrepoids la chaudière, l'eau, etc.

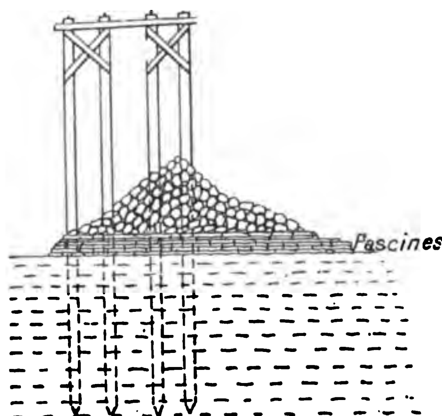
Une pompe à vapeur, placée sur une charpente suspendue à la

plateforme, fournit l'eau d'injection destinée à faciliter la pénétration du pieu.

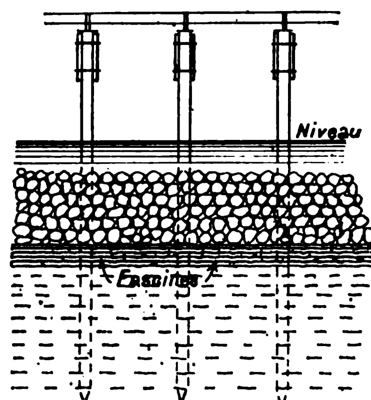
Les montants de la sonnette ont 15 mètres, le mouton pèse 2250 kilogrammes. Le tuyau d'injection, de 11 *cm* de diamètre, se bifurque et



Méthode de pose des matelas.



Coupe transversale.



Élévation.

Fig. 238. — Môle de la rivière Columbia.

chaque branche, terminée par une lance de 37 millimètres de diamètre, amène l'eau sous pression à la base du pieu.

La sonnette, en tournant avec la plateforme, saisit le pieu que lui porte un wagonnet (fig. 239). Elle le place entre ses montants, le mouton reposant sur la tête. L'eau est injectée, tandis qu'on frappe quelques coups. L'enfoncement à 6,75 *m* de profondeur s'exécute en quatre minutes.

Les pieux enfoncés étant reliés par une traverse, les longrines de l'échafaudage sont alors avancées ainsi que la plateforme.

L'avantage des ponts de service est si considérable que ceux qui avaient servi à l'édification du môle de Portland furent conservés pour

la construction de la digue, malgré sa séparation du môle par une passe de 120 mètres, sur laquelle il fallut continuer l'échafaudage.

C'est qu'avec ce procédé le travail se continue par tous les temps, sans crainte de chômage d'un nombreux personnel ; la conduite des opérations est facile, car la vérification de la hauteur et de la largeur de l'ouvrage peut se faire à tout moment.

Mais il importe de mettre la charpente hors de l'atteinte des vagues : le platelage sera à 6 mètres au moins de hauteur. Au môle sud d'Aberdeen le tablier était à 9 mètres et c'est l'un des

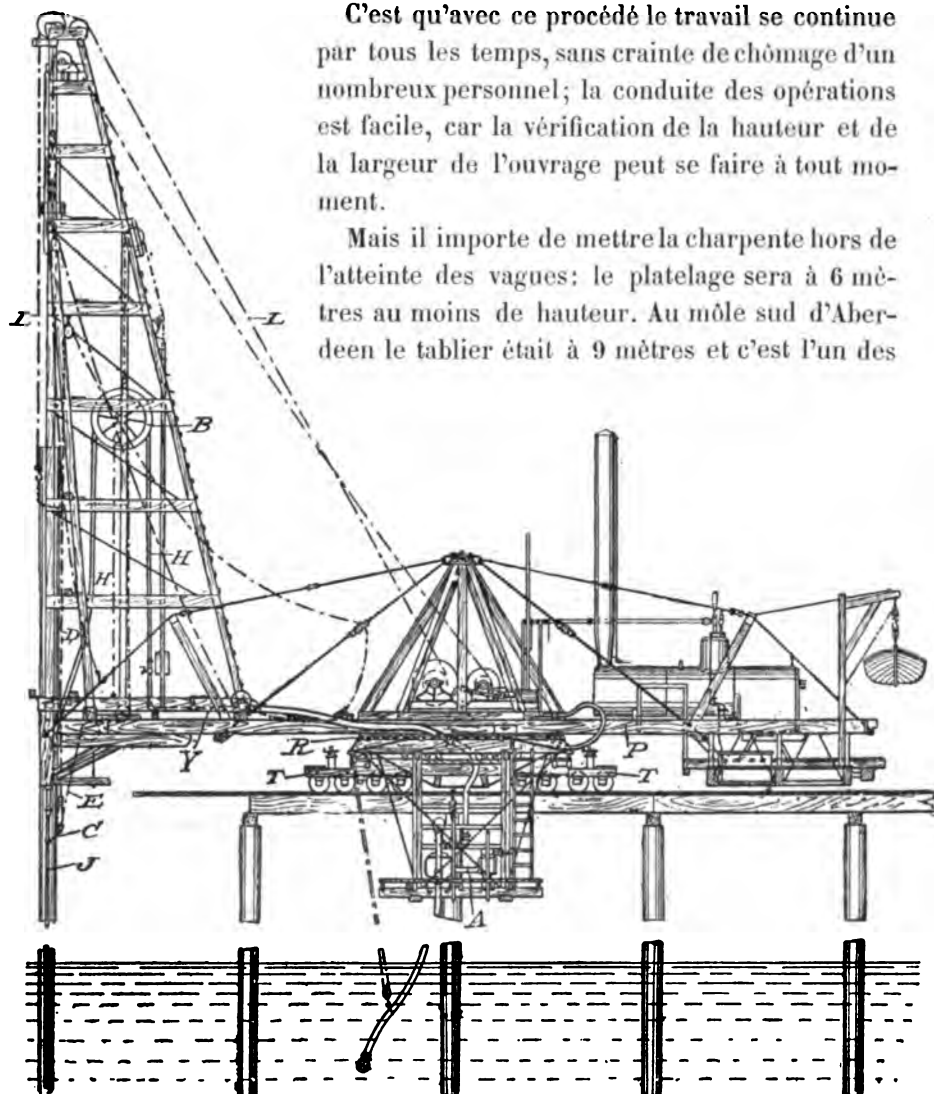


Fig. 239. — Pose des pieux à Columbia River.

rares échafaudages qui n'aient pas éprouvé d'avaries. Le système suivi à l'île de Man (Douglass) ne convient qu'aux localités abritées.

Chalands. — Malgré l'exemple de Portland, les appontements ne sont guère employés pour le transport des enrochements destinés à une

digue. On se sert alors en général de chalands. Le procédé est d'ailleurs assez rapide et économique pour qu'il ait été également appliqué aux môles. Le nombre des pontons en service peut être considérable ; le chargement et le déchargement sont faciles; le travail, par contre, est suspendu pendant le mauvais temps.

L'axe de l'ouvrage est au préalable piqueté par des bouées ancrées aussi à pic que possible et qui indiquent la zone de vidange des enrochements. A Cherbourg, elles étaient trop espacées; il en est résulté une largeur exagérée de la section.

Les chalands du môle Galliera, à Gênes, étaient pontés à plat. Pour les vider des hommes debout balançaient le bateau; les pierres se précipitaient d'un côté, où avait été disposé un excès de charge.

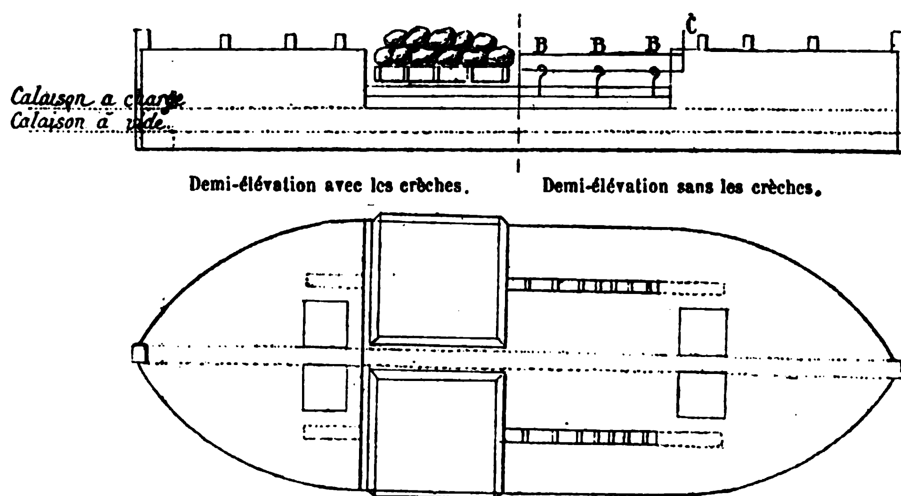


Fig. 240. — Chaland Millon. Plan.

A Saint-Jean-de-Luz, M. Millon a installé des chalands à facile déchargement (fig. 240).

Le bateau contient quatre crèches en forte tôle, pivotant dans le sens transversal, établies sur des paliers en fonte, fixées à deux poutres longitudinales AA et portant au centre de gros doigts en fer où s'engagent des crochets B, mus par des leviers C. Le chargement reçoit un excès de poids sur les bords. En lâchant les crochets, les crèches s'inclinent de 30°, l'enrochement se vide. La crèche elle-même étant plus lourde au centre se relève seule. La charge est de 40 à 50 tonnes.

Le système le plus rapide de vidange, c'est le clapet inférieur mobile.

A Boulogne (fig. 241), les dimensions des chalands étaient de 25 mètres de longueur sur 6 mètres de largeur. Les puits à matériaux avaient 2,70 *m* de largeur moyenne et 1,75 *m* de hauteur; ils occupaient une longueur de 16 mètres, partagée en compartiments de deux mètres par des cloisons. La fermeture de chacun des huit puits se composait de deux clapets s'ouvrant sur des charnières latérales et maintenus en place par des chaînes enroulées sur un arbre longitudinal courant au-dessus des puits et pouvant tourner sous l'action d'un engrenage que commandait un déclic.

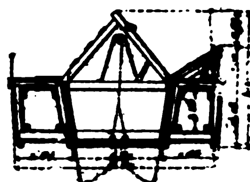


Fig. 241. Chaland pour enrochements; Boulogne.

La charge totale était de 210 tonnes.

Embarquement des enrochements. — A Boulogne (fig. 242), le chaland venait charger sous un tablier, mobile autour d'un essieu horizontal et retenu par un moufle. Les wagonnets déchargeaient les pièces sur le tablier qu'on faisait basculer quand la charge était suffisante; de cette façon les chocs contre les parois du bateau étaient presque évités.

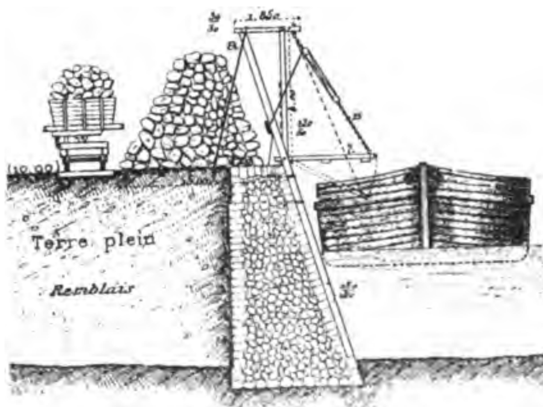


Fig. 242. — Chargement des enrochements; Boulogne.

Les chalands ne peuvent être employés que sur les points où existe un abri pour les garer dans les mauvais temps. Des petits ports provisoires ont été parfois construits dans ce but (Boulogne, Libau, Alderney).

POSE DES BLOCS ARTIFICIELS

Echafaudages. — Les blocs ne peuvent être jetés d'un échafaudage sans se briser; pour eux, un pont de service ne peut être affecté qu'à porter la voie d'un treuil roulant auquel on suspend les matériaux. A Douglass, on a utilisé ainsi l'échafaudage qui avait servi à la pose des enrochements.

Douvres. — Les blocs de béton et les pierres de taille du parement au môle de l'Amirauté ont été posés au moyen de cloches à plongeur, dont la capacité limitait d'ailleurs leur volume. La manœuvre des cloches se faisait du haut d'un échafaudage dont chaque palée était formée de trois pieux de 30 mètres de longueur, enterrés de 2 mètres dans le fond calcaire. Cet échafaudage fut entièrement renversé par une tempête en 1869.

Aux nouveaux travaux de Douvres, le môle est du port commercial sera, sur 500 mètres de longueur, construit en blocs artificiels de béton dont le poids va jusqu'à 40 tonnes. La section aura 14,65 *m* de largeur à la fondation et 10,65 *m* au couronnement, élevé à 3 mètres au-dessus du niveau de la mer. C'est encore à l'aide d'un échafaudage qu'a lieu la construction. Sur la plateforme roulent trois puissantes grues dites Goliath. La plus avancée porte une drague à mâchoires, qui déblaie les matières superposées au banc de calcaire constitutif du fond de la mer. A la grue centrale est suspendue une cloche à plongeur sous laquelle les ouvriers creusent et nivellent le banc à la profondeur d'un mètre. La troisième pose les blocs.

Ceux-ci sont réunis entre eux par des tenons en queue d'aronde; ils sont parementés en granite dans l'eau et au mortier de ciment au-dessus de la surface.

Les môles du grand port de guerre seront construits dans le même système, mais avec des dimensions plus considérables. Aussi l'échafaudage qui sert au prolongement du môle de l'Amirauté a 35 mètres de largeur; la hauteur totale, comprise celle du Goliath qui y circule, est de 45 mètres.

Ces Goliaths ont leur longrines élevées de 7,60 *m* et longues de 42 mètres, la portée entre les beffrois étant de 30 mètres. Leur poids atteint 220 tonnes.

Rosslare. — La digue qui ferme la rade de Rosslare est reliée au rivage par un pont métallique ; on a donc pu la construire au moyen d'un échafaudage dont la simplicité peut servir de type pour des ouvrages peu importants (fig. 243). La rade est d'ailleurs assez abritée. Le profil se compose de deux murs parallèles en blocs de 8 tonnes (2,75 × 1,35 × 0,90 *m*) avec un comblement intérieur. Ils sont établis par des fonds de 5,50 *m* à 6,75 *m*. Le mur à la mer avec le parapet a une hauteur moyenne de 13 mètres.

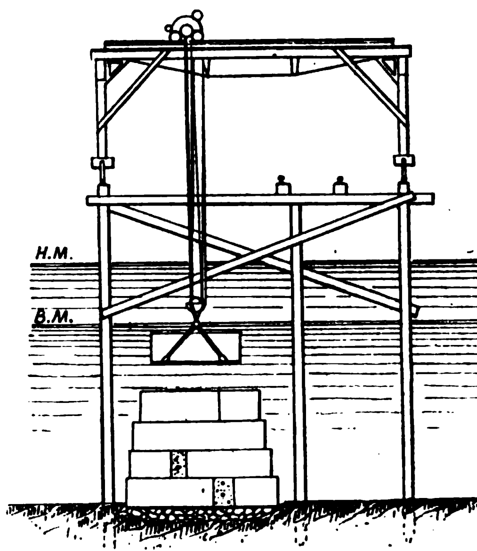
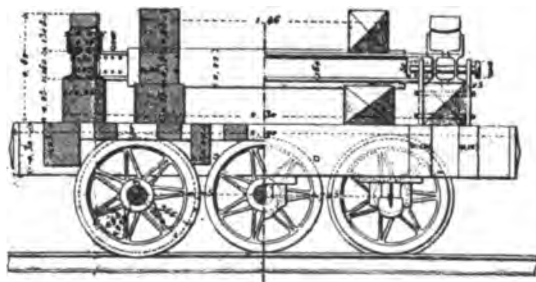


Fig. 243. — Pose des blocs à Rosslare.

Un échafaudage porte une voie ferrée sur laquelle roule une grue transversale. On a pu, avec cet appareil, poser jusqu'à trente et un blocs par jour, mais la moyenne annuelle n'a atteint qu'un millier, soit environ 3 350 mètres cubes.

Le prix de cet échafaudage n'a été que de 150 francs par mètre courant de môle.

Wagonnets. — A Boulogne (fig. 244), le transport des blocs s'effectuait par chemin de fer sur des trucs à trois essieux dont la plateforme


Fig. 244. — Truc verse-blocs de Boulogne.

tournait autour d'une charnière fixée à l'une des traverses longitudinales. Un vérin soulevait la plateforme et quand l'inclinaison atteignait 10 0/0

le bloc glissait dans la mer. Il risque d'ailleurs de se briser dans la chute, accident assez fréquent.

Tonnes (fig. 245). — A Alger, les blocs destinés à être transportés en mer étaient amenés par un truc qui descendait au-dessous du niveau de l'eau sur un plan incliné. Là, des chaines les attachaient sous un ponton composé de deux tonnes réunies par une charpente et qu'on halait au-dessus. Le truc, descendu ensuite un peu sur le plan incliné, se détachait du radeau, qu'un remorqueur conduisait au môle.

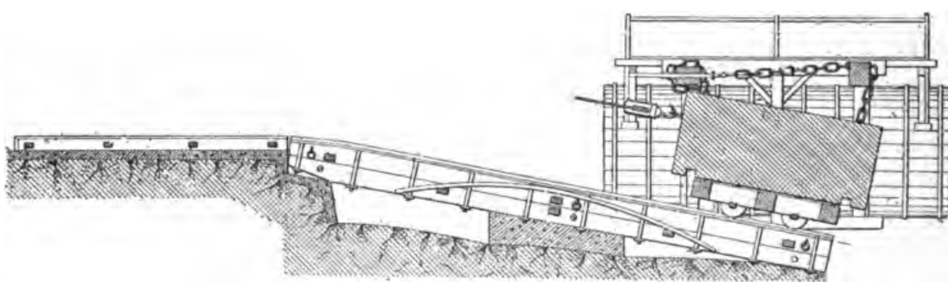


Fig 245. — Emploi des tonnes à Alger.

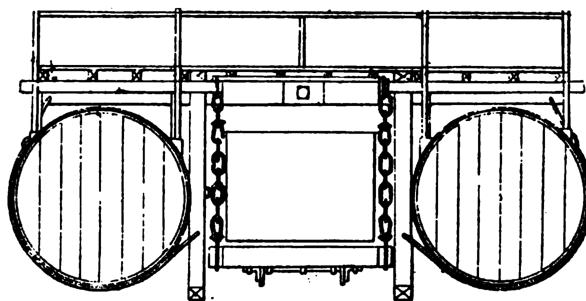


Fig. 245 — Coupe transversale.

Les tonnes étaient des cylindres creux en bois, de 6 mètres de longueur et 2,50 *m* de diamètre.

Une seule tonne suffisait pour les petits blocs; elle était attachée de même à leur face supérieure.

Chalands. — Le transport des blocs s'opère aussi par chalands. A Boulogne (fig. 246), ceux-ci avaient $22 \times 6 \times 2{,}80$ *m* et étaient partagés en trois puits sans fond. Les blocs y étaient tenus suspendus par des chaînes qu'actionnaient des treuils placés sur des entretoises supérieures. La manœuvre d'un déclic amenait l'immersion. Ce système

est rapide, mais il offre des inconvénients et n'est d'ailleurs plus pos-

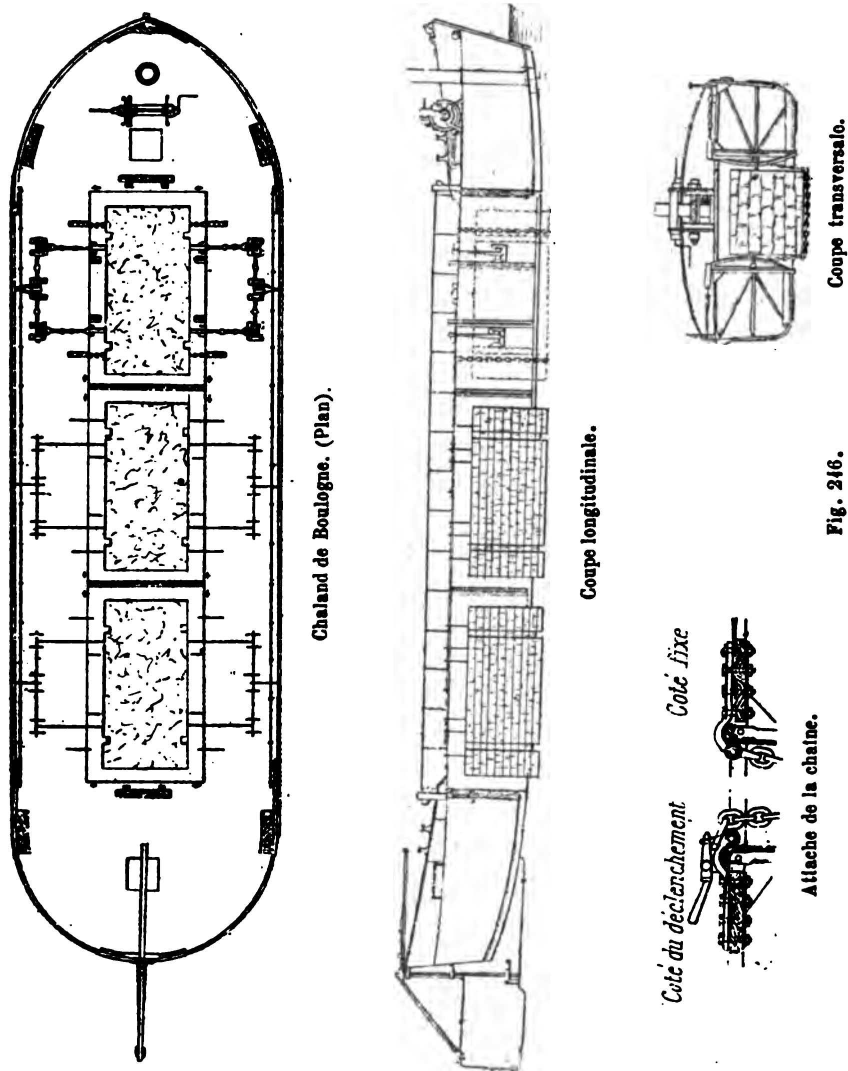


Fig. 246.

sible quand l'ouvrage a atteint la hauteur au-dessus de laquelle le chaland ne peut pas passer.

Tees. — Les môles de la Tees ont été protégés par des blocs en béton de scories de 300 à 500 tonnes, fabriqués dans une crique abritée par le môle lui-même, puis transportés sur l'ouvrage de protection. Les plus gros consistaient dans le remplissage en béton de vieilles coques

qu'on coulait à l'endroit voulu. Ceux de 300 tonnes étaient construits à terre sur une plateforme établie au niveau du quart de l'amplitude de marée. Deux chalands formant un ensemble analogue à celui employé à Greenore pour l'établissement du quai (fig. 247) se rangeaient de

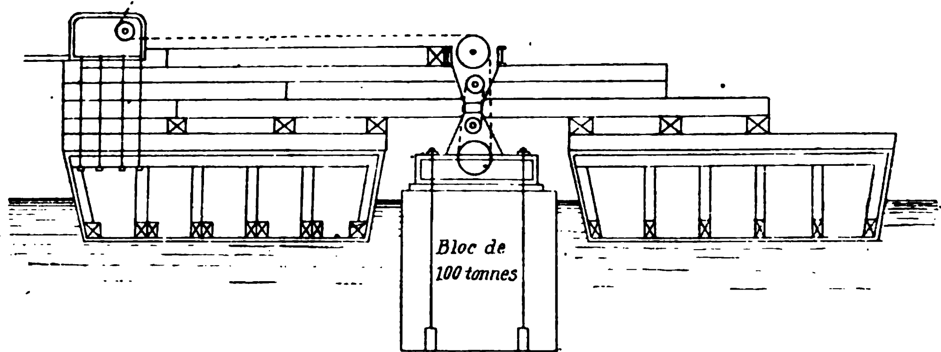


Fig. 247. — Chalands pour la pose des blocs à Greenore.

chaque côté du bloc, le soulevaient à haute mer et le conduisaient à sa place.

On verra à propos du quai de Brest les inconvénients du mode de construction à la marée.

Embarquement des blocs. *Sulina.* — Aux môles de Sulina (Danube), l'embarquement des blocs de 35 tonnes s'opérait par un

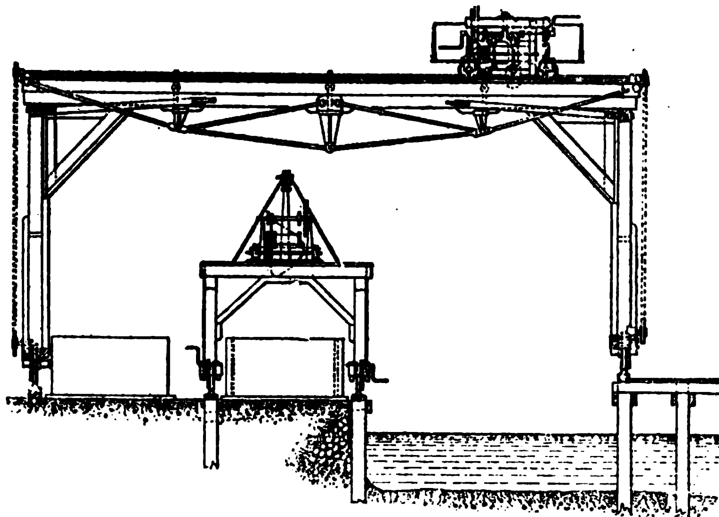


Fig. 248. — Embarquement des blocs à Sulina.

Goliath (fig. 248) haut de 6 mètres, avec une portée de 16 mètres, dont

le tiers au-dessus du fleuve. Un bardeur apportait les blocs sous la grue qui les déposait sur des chalands pontés; au môle, ils étaient précipités pêle-mêle ou repris par une grue flottante qui les mettait à leur place.

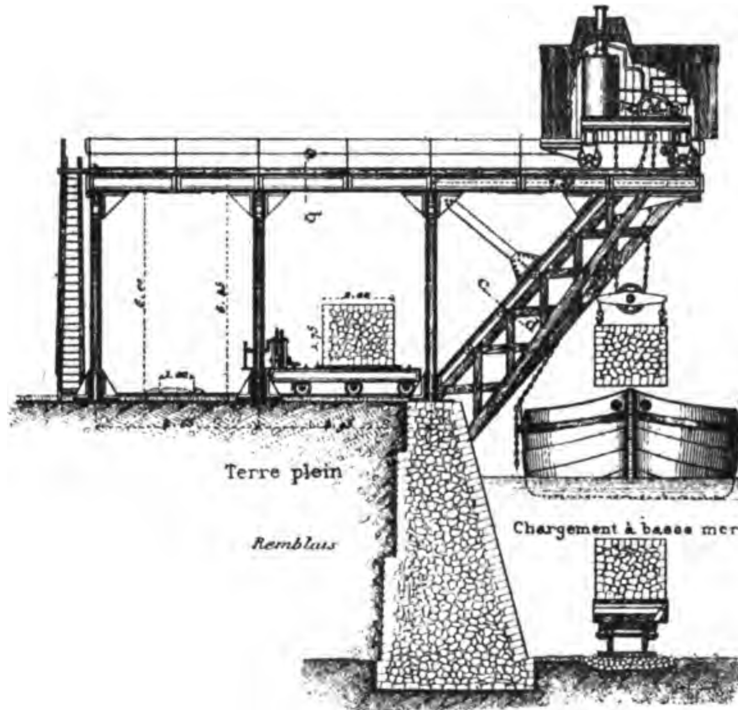


Fig. 249. — Grue de 45 tonnes pour le chargement des blocs, Boulogne.

A Boulogne, l'embarquement s'effectuait par une grue fixe de 45 tonnes (fig. 249).

Grues flottantes. — A Gênes, c'étaient des gros blocs naturels que l'on employait pour le revêtement des talus.

Extraits de la carrière, située dans l'enceinte même du port à la Chiapella, ils étaient traînés au quai par des bœufs attelés à un traineau sans roues, dont le cadre glissait sur une voie en bois. Les blocs artificiels y étaient amenés par des wagonnets. Là une grue flottante les déposait sur des chalands que des remorqueurs transportaient à pied d'œuvre, où une grue semblable les reprenait et mettait en place.

La figure 250 représente la grue flottante employée au port de la Luz.

A Cork, la coque de la grue flottante était un trapèze, dont la base large supportait les bigues; le contrepoids, au contraire, était à la base

étroite. L'enfoncement était ainsi diminué sous la charge. L'ensemble était calculé de façon à dispenser de vider les réservoirs de contrepoids au moment de la pose. Cette précaution est importante, car il est souvent nécessaire de reprendre les blocs, pour les placer exactement.

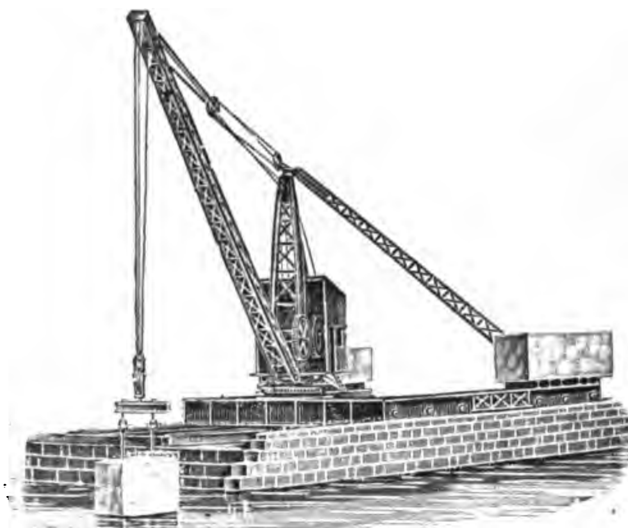


Fig. 250. — Grue de la Luz.

Les réservoirs, pour des blocs de 50 tonnes, contenaient 83 tonnes d'eau.

Grues. — Les procédés précédents ne sont applicables que dans les mers tranquilles. Là où les vagues sont trop violentes, on se sert de grues mobiles, qui s'avancent à mesure de l'avancement sur le môle lui-même; le système n'est donc pas possible pour les digues, du moins économiquement. Les petits blocs sont manœuvrés par des grues ordinaires; pour les gros, on a combiné des engins spéciaux auxquels leurs dimensions ont fait donner le nom de *Titans*.

Ils ont d'abord servi à Ijmuiden et à Manora.

Titans. — En principe, le Titan se compose de deux poutres longitudinales en porte-à-faux sur quatre montants portés eux-mêmes par un truc mobile. La partie déjà construite du môle reçoit une forte voie ferrée sur laquelle roule le truc. Les poutres longitudinales supportent un treuil à chariot, qui soulève le bloc amené sous l'appareil par une

voie ferrée, le conduit jusqu'à l'extrémité du porte-à-faux et le dépose à sa place.

L'instrument doit donc avoir trois mouvements : celui de progression sur la voie ferrée, le déplacement longitudinal du chariot sur les poutres, et enfin un déplacement latéral pour pouvoir poser le bloc dans toute la largeur du môle.

Dans le Titan de *Manora*, les trois mouvements étaient rectangulaires. A *Sunderland*, le déplacement latéral était obtenu par la rotation des deux poutres autour d'un axe placé à l'aplomb des montants supérieurs du truc-beffroi. Au-dessus de ces montants, une couronne de galets reliée aux poutres roulait sur un arc de cercle assez étendu pour permettre la rotation nécessaire.

C'est le même système qui a été appliqué à *Tynemouth;* mais les montants du truc sont inégaux, de sorte que les roues de progression portent sur des rails placés l'un sur le parapet du môle déjà construit, l'autre sur le couronnement par où arrivent les blocs. Il a été ainsi remédié à l'inconvénient ordinaire des Titans qui est de nécessiter une hauteur assez grande pour le passage du wagonnet porte-bloc sous l'appareil.

A la *Pointe des Galets*, Réunion, la rotation autour de l'axe est complète. Nous décrirons avec plus de détails cet appareil perfectionné.

Les deux poutres longitudinales sont des flasques à treillis, écartées de 4 mètres. Le chariot est actionné par un câble sans fin en coton, mû par une machine à vapeur située sur l'arrière de la poutre. La rotation s'effectue de la façon suivante : l'appareil s'appuie par une crapaudine sur le sommet d'un piston hydraulique d'un mètre de diamètre, susceptible d'une course verticale de 15 *cm*. Le centre de gravité de l'ensemble étant ramené sur ce piston, on fait agir la presse, l'appareil ne pose plus sur le sol et l'on imprime le mouvement de rotation par des presses hydrauliques horizontales situées sur le côté.

La grue était portée par un grand truc de 16,50 *m* de longueur roulant sur une voie ferrée ; le mouvement longitudinal lui était communiqué par deux appareils hydrauliques de 3 mètres de course avec multiplication sextuple, placés de chaque côté.

La manœuvre du fardeau, sur 9,15 *m* de hauteur, était obtenue par trois cylindres hydrauliques placés sur la volée, et dont la course était de 4,50 *m* avec rapport quadruple.

La poutre-volée avait 43 mètres de longueur, la partie en porte-à-faux 21,80 *m*; l'appareil pesait 300 tonnes. Il ne portait sur les roues

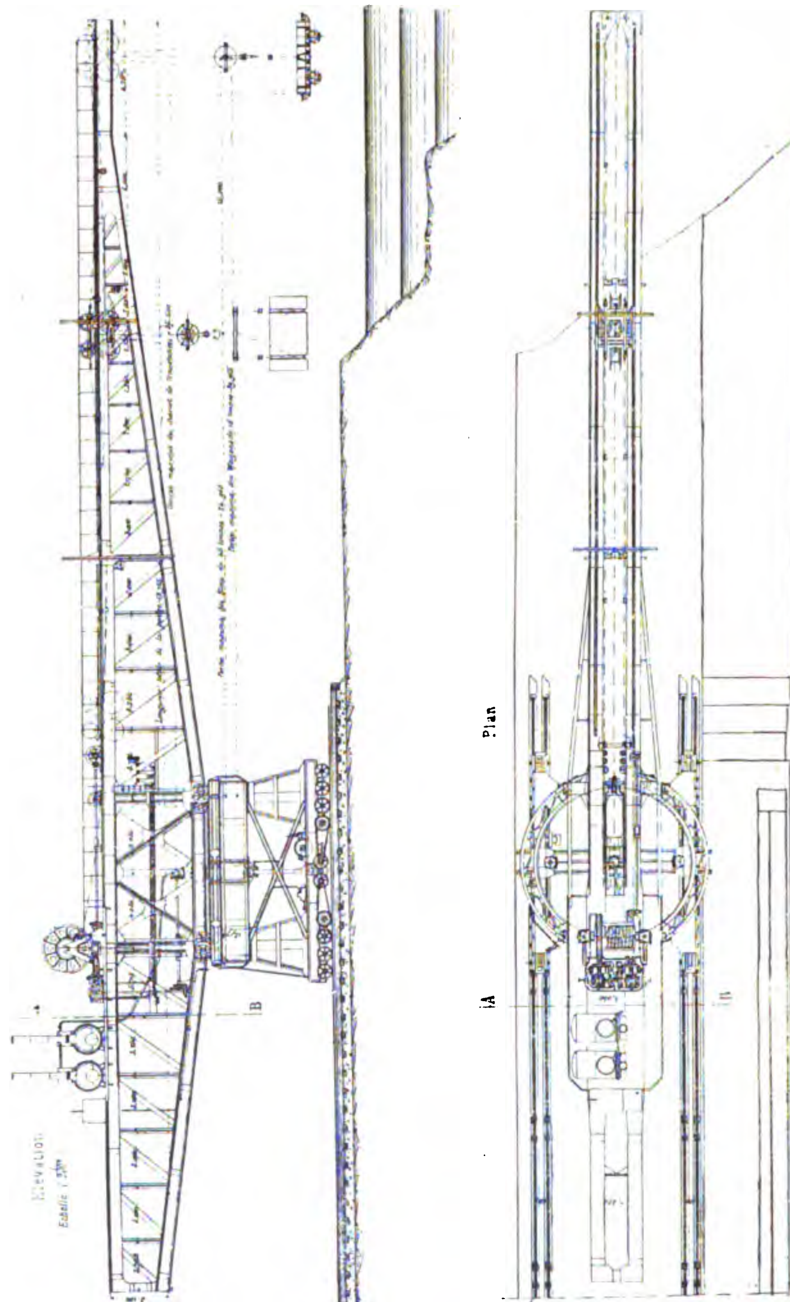


Fig. 251. — Titan de Leixoes. Élévation et plan

d'avancement que pendant la progression; en travail, on soulevait l'appareil au moyen du pivot central et on le laissait reposer sur des semelles en bois, les roues restant en l'air.

Il fallait une heure pour la manutention complète d'un bloc.

Leixoes (fig. 251). — Le titan de Leixoes, dû aux mêmes constructeurs que celui de la Pointe des Galets, en diffère par plusieurs points. La volée se compose de deux poutres de 68,75 *m* de longueur, cantilever, ayant 5,50 *m* de hauteur au milieu et 80 *cm* à l'extrémité. La partie en porte-à-faux est de 46 mètres et le chariot peut s'y avancer sur une distance de 44 mètres. Le truc inférieur, long de 12 mètres, roule sur 32 galets disposés en quatre rangées sur des rails, entre lesquels arrive la voie ferrée du truc aux blocs. La plateforme du chariot porte un beffroi dont la table reçoit un chemin circulaire de 9,20 *m* de diamètre sur lequel la volée tourne autour d'un pivot au moyen de 16 galets, disposés par groupes de quatre, montés sur des balanciers en fer forgé dont le rôle est d'assurer l'égale répartition de la charge. Toutes les manœuvres se font par la vapeur; la machine de 30 chevaux est installée sur le prolongement des poutres destiné à faire contrepoids à la charge. Un lest additionnel de 80 tonnes assure la stabilité de ce côté.

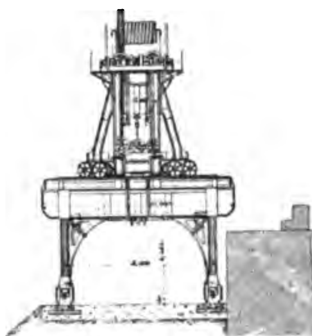


Fig. 251. — Coupe du titan de Leixoes.

Cet appareil pose des blocs de 50 tonnes à une distance de 25 mètres de l'axe de rotation; les blocs de 15 tonnes et les wagonnets chargés de pierres pour le substratum s'avancent jusqu'à 40 mètres.

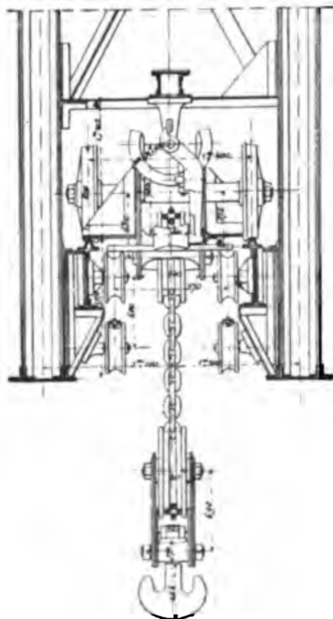


Fig. 252. — Titan de Punta Delgada. Vue d'une bascule et du chariot.

Titan de Punta Delgada, Açores (fig. 252). — Pose à 30 mètres de distance des blocs de 35 tonnes, et jusqu'à 45 et 50 mètres des blocs de 15 tonnes et des enrochements naturels. Il présente quel-

ques détails intéressants de construction. Ainsi, le chariot, n'ayant que 2,30 *m* de hauteur, circule à la partie inférieure des poutres, qui ont pu dès lors être contreventées latéralement; elles ont de 3,40 *m* à 6 mètres de hauteur de l'extrémité au centre d'appui. Les galets sont montés sur balanciers pour assurer entre eux l'égalité de la charge.

Peterhead (fig. 253). — Un type de grand titan anglais est celui qui a été construit pour les travaux du port de refuge de Peterhead, au nord de l'Ecosse, et qui peut poser un bloc de 50 tonnes à 25 mètres. La volée est formée de deux grands cantilevers longs de 49 mètres, dont la hauteur est de 3,35 *m* au centre, et distants de 2,75 *m* de centre en centre.

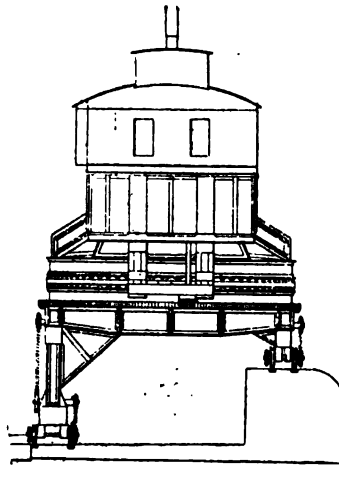


Fig. 253. — Vue latérale du titan de Peterhead.

Un pivot de 25 *cm* de diamètre les partage en deux parties longues, l'une de 15, l'autre de 34 mètres. La portion de 34 mètres est celle qui forme le porte-à-faux pour le travail; sur l'autre se trouvent le contrepoids et la machinerie.

Autour du pivot la volée tourne par l'intermédiaire de 52 galets sur un chemin circulaire de 9,50 *m* porté par le beffroi qui lui-même repose sur 32 roues. Celles-ci sont disposées sur quatre rails, dont deux couronnent le parapet et les deux autres sont placés à 3,30 *m* plus bas. Le chariot porte-blocs arrive dans l'intervalle sur une voie ferrée. Les diverses vitesses sont par seconde : élévation, 3 *cm*; transport du bloc sur la volée, 60 *cm*; progression de la machine : 62 *cm*. Une révolution se fait en cinq minutes.

La nécessité d'avoir un instrument aussi puissant provenait des conditions de la baie. La mer y est très forte. La profondeur en hautes

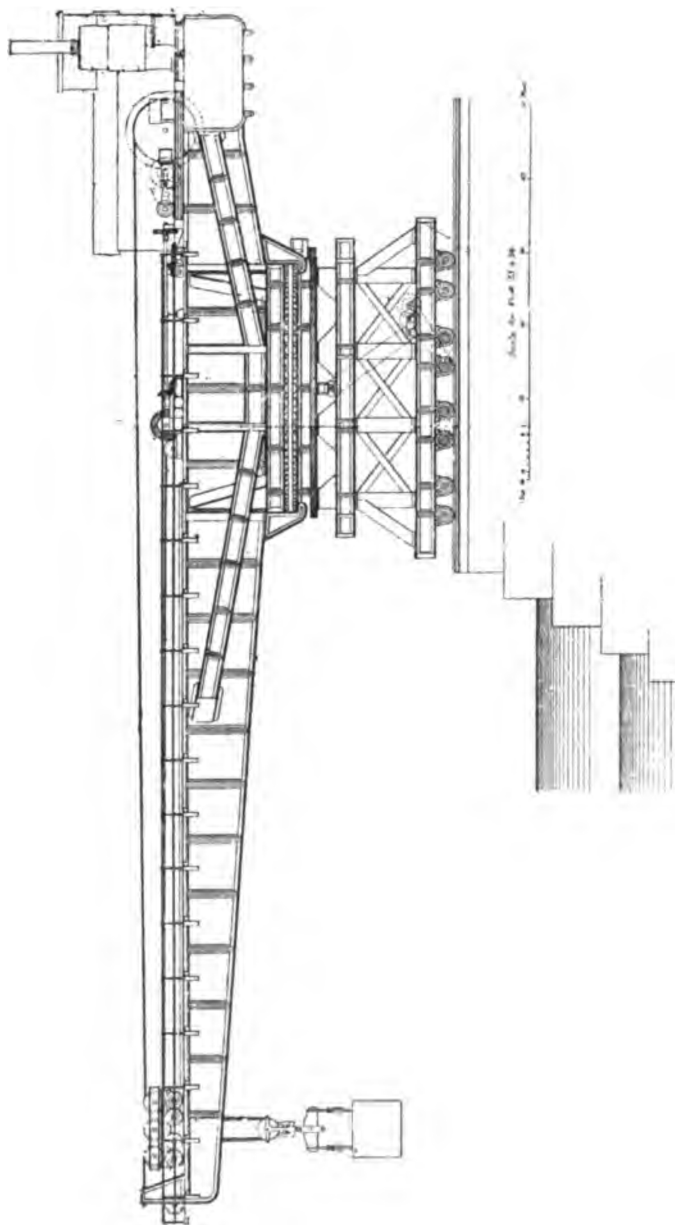


Fig. 253. — Titan de Peterhead. Élévation.

eaux dépasse 20 mètres, et le bras de la grue est nécessairement très long.

Bilbao. — Les blocs du môle de Portugalete ont été posés par un titan du type « à nez crochu », combiné pour les ports de East-London et Port-Alfred et qui peut porter 15 tonnes à 14 mètres.

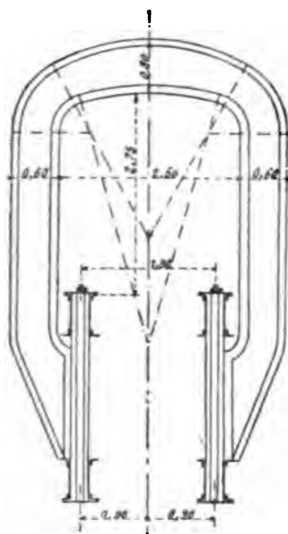


Fig. 254. — Bilbao, coupe EP. Contreventement.

Au môle de l'ouest du port extérieur, on se sert d'un titan électrique (fig. 254) dont la longueur 47,80 *m* se divise en deux parties : l'une de 31,80 *m* en porte-à-faux et l'autre de 16 mètres sur lequel est le contrepoids. Il peut poser des blocs de 60 tonnes à 15 mètres. Tous les mouvements sont produits par l'électricité ; la dynamo génératrice est actionnée par une machine de 75 chevaux ; elle envoie le courant à trois dynamos réceptrices. La première montée sur le chariot mobile sert au levage des blocs et à l'avancement du chariot sur la poutre ; la seconde, placée à la partie centrale de la poutre, donne le mouvement de rotation et la troisième enfin fait marcher l'appareil. Le poids total du titan est de 270 tonnes.

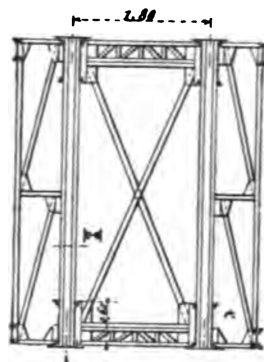


Fig. 254. — Bilbao. Coupe AB.

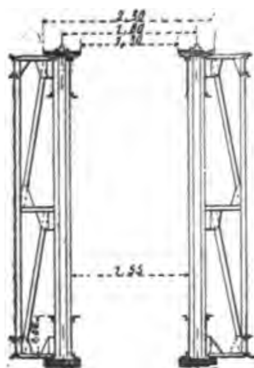


Fig. 254. — Bilbao. Coupe CD.

Au contre-môle de l'est, le titan (fig. 255) est d'une autre forme ; la poutre armée a 54 mètres de longueur, dont 34 mètres en porte-à-faux. Il peut lever 60 tonnes à 17 mètres et 18 tonnes à 32 mètres.

La poutre armée est triangulaire ; sa hauteur est supérieure à 15 mètres au montant central, d'où partent des tirants qui assurent la résistance. D'autres étais sont fixés à deux poutres de fer transversales de 11 mètres de longueur. Le moteur est identique à celui de la grue précédente.

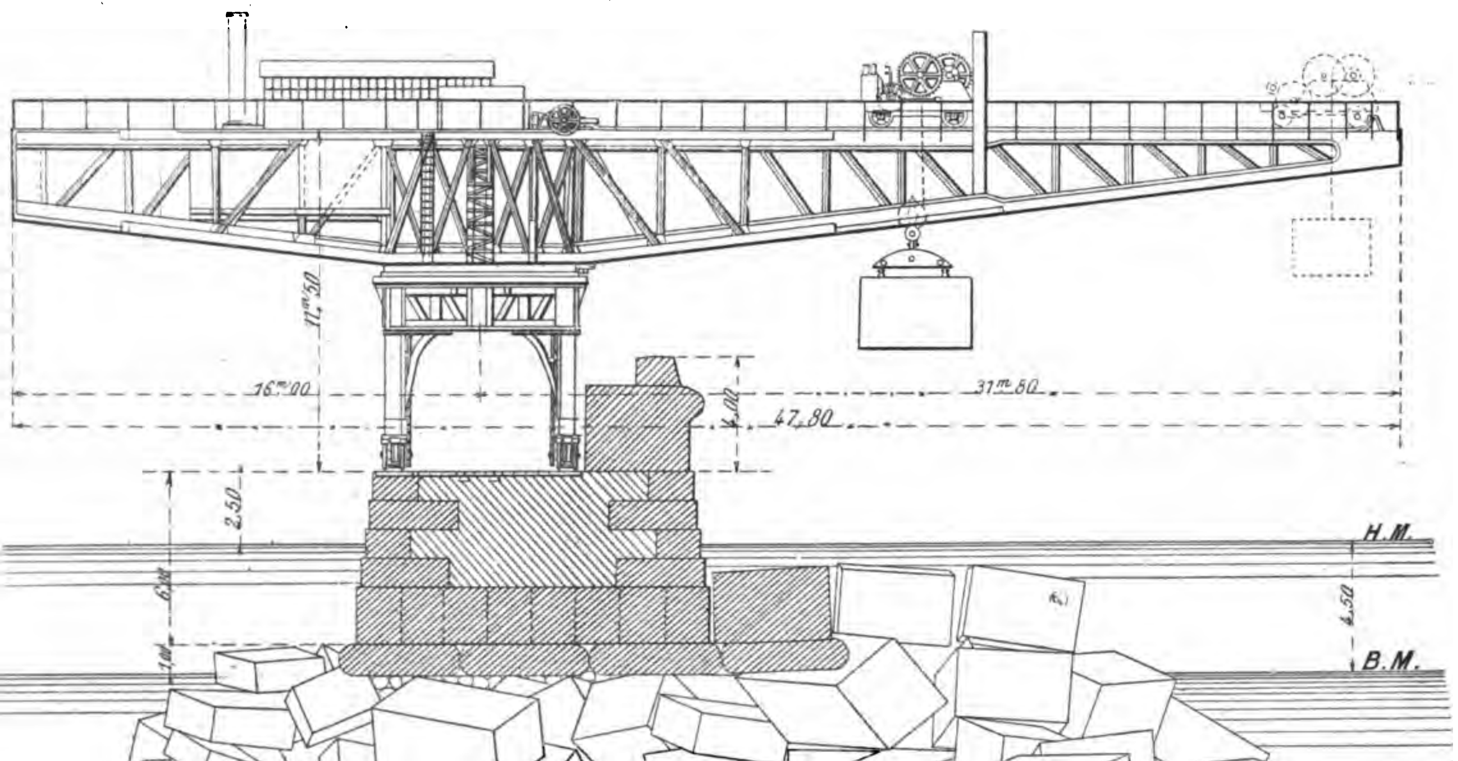


Fig. 254. — Titan électrique de Bilbao.

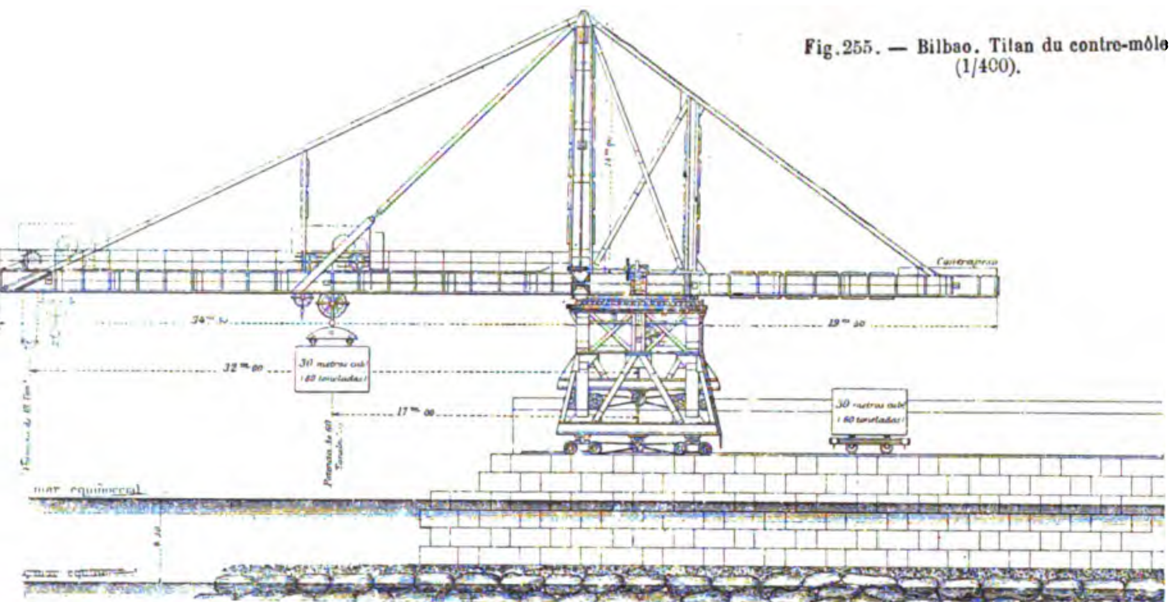
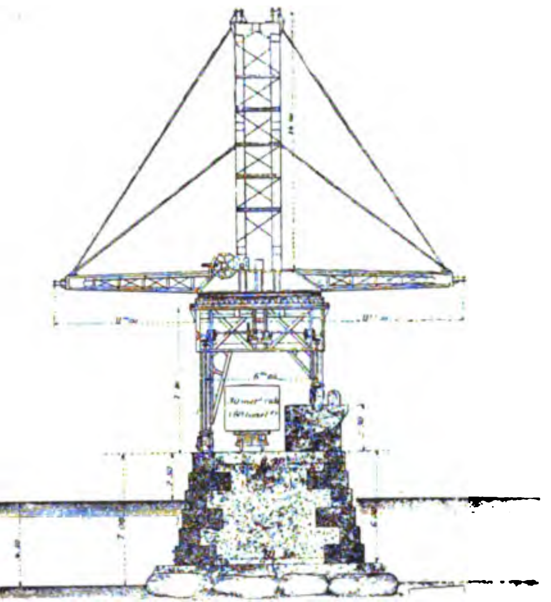



Fig. 255. — Bilbao. Titan du contre-môle (1/400).

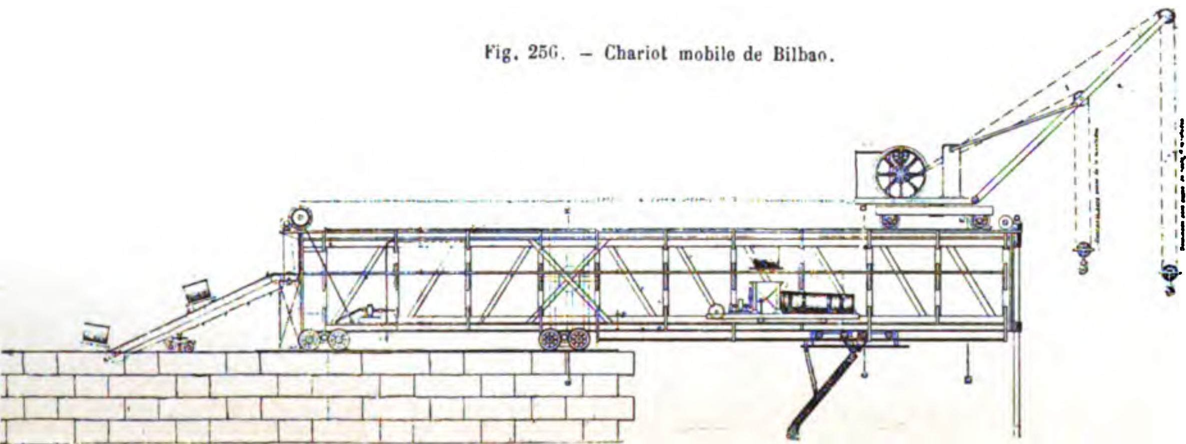
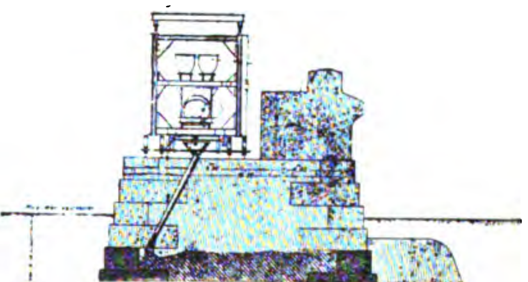



Fig. 256. — Chariot mobile de Bilbao.

Chariot mobile (fig. 256). — Au môle extérieur de Bilbao la superstructure du premier type projeté se composait de blocs artificiels de 4,5 m^3 posés en parpaings et boutisses, formant murs latéraux entre lesquels était versé un massif de béton. Ces opérations étaient exécutées par un chariot, mobile sur la portion déjà construite du môle.

Il se compose de deux poutres de 31,70 *m* de longueur et 4,50 *m* de hauteur, écartées de 3,75 *m* d'axe en axe et fortement réunies. Elles sont portées par quatre bogies à quatre roues roulant sur deux voies de 70 *cm*.

Le poids du chariot seul est de 70 tonnes ; il atteint 210 tonnes avec les accessoires. Un contrepoids de 80 tonnes, placé à l'arrière, permet un porte-à-faux de 20 mètres de longueur. A l'extrémité se trouvent d'ailleurs deux bigues qui servent de points d'appui ; elles sont manœuvrées par un pignon et une crémaillère.

Une grue mobile à main de 10 tonnes sert à la pose des blocs du parement (9 tonnes).

Vers le milieu de la hauteur des poutres est établi un pont où roulent sur voie ferrée double les wagonnets qui portent les matériaux destinés à la fabrication du béton. La double voie sert l'une pour les wagons pleins, l'autre pour les vides ; ils passent de l'une à l'autre par une plaque tournante située à l'extrémité.

Les matériaux sont jetés dans une bétonnière dont la production atteint 30 mètres cubes par heure. Le béton est versé par un couloir.

Tous les mouvements sont produits par l'électricité. A cet effet, sur le même pont sont installées deux dynamos, l'une pour la bétonnière, l'autre pour les wagonnets, la pompe qui donne l'eau nécessaire au béton et enfin le mouvement du chariot.

L'électricité est produite à terre par une machine à vapeur de 35 chevaux. La dynamo génératrice exécute 500 révolutions à la minute et donne 24 000 watts ou 32,6 chevaux. L'énergie est transmise aux dynamos réceptrices dont la vitesse atteint 600 tours et qui rendent chacune 12,50 chevaux.

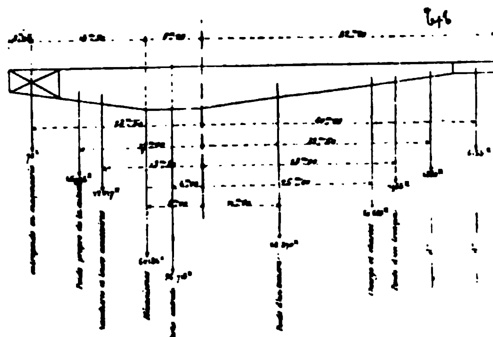


Fig. 257. — Stabilité du titan de Leixoes.

Stabilité d'un titan. — Le schéma (fig. 257) indique la méthode de calcul de la stabilité du titan de Leixoes.

1° *Stabilité sous charge :* Moments :

Côté du contrepoids			Côté de la charge		
78 000 *kg*	× 23,50 *m*	= 1 833 000	6 155 *kg*	× 40,00 *m*	= 246 200
45 995	× 17,00	= 781 915	4 880	× 33,50	= 163 480
12 017	× 13,80	= 165 835	7 965	× 28,00	= 223 020
60 184	× 8,00	= 481 472	60 688	× 25,00	= 1 517 200
56 718	× 4,00	= 226 872	58 370	× 11,60	= 677 092
252 914		3 489 094	138 058		2 826 992

Différence des moments : 662 102.

La résultante passe donc à une distance des appuis d'avant égale à

$$\frac{662\,102}{252\,914 + 138\,058} = 1{,}690\,m$$

et des appuis d'arrière à 8 — 1,690 = 6,310 *m*, 8 mètres étant la distance entre les deux appuis.

La réaction sur les appuis d'avant est :

$$\frac{(252\,914 + 138\,058)\,6{,}31}{8} = 308\,379$$

2° *Stabilité à vide.* — Rien n'est changé du côté du contrepoids. De l'autre côté, les moments sont :

6 155	× 40,00 =	246 200
4 880	× 33,50 =	163 480
7 965	× 23,00 =	223 020
58 370	× 11,60 =	677 092
77 370		1 309 792

Différence des moments : 2 179 302.

La résultante passe alors à

$$\frac{2\,179\,302}{252\,924 + 77\,370} = 6{,}598\,m$$

et la réaction sur les appuis d'arrière est

$$\frac{320\,284 \times 6.598}{8} = 272\,000$$

Il faut ajouter, dans les deux cas, le moment du chevalet qui pèse 120 000 kilogrammes et agit à 4 mètres, soit encore un moment de 480 000.

Puissance d'action. — Dans le titan de Manora, le poids du bloc était de 27 tonnes, on pouvait le déposer à 8 mètres de distance (moment = 216). Dans les appareils subséquents, on a de beaucoup dépassé ces nombres.

Localités	Poids des blocs t	Distance de pose m	Moment
Manora	27	8	216
Mormugao . . .	40	7,60	304
Tynemouth . . .	42	22	990
Peterhead . . .	50	25	1 250
Pointe des Galets .	115	6,80	782
Leixoes	50	25	1 250
Punta Delgada. .	35	30	1 050
Vera-Cruz . . .	40	18,30	732
Bilbao Môle ouest.	60	15	900
Bilbao — est .	60	17	1 020

La supériorité du titan sur la grue ordinaire consiste dans la variabilité de la distance de dépôt. C'est la raison qui en a déterminé l'adoption, même pour les blocs de 15 tonnes seulement, comme à East-London. Ces derniers appareils sont d'ailleurs trop petits pour recevoir les wagons sous la volée ; ils prennent la charge en exécutant une rotation. A Punta-Delgada, on l'a vu, le chariot roule sur la partie inférieure de la volée et vient chercher le bloc à l'arrière.

La construction des titans exige une grande expérience. Il faut veiller spécialement à la suspension par ressorts qui assurent l'égale répartition de la charge sur les roues; les balanciers ajoutés récemment donnent encore une plus grande sécurité. Pour la même raison, le nombre des galets de roulement est considérable.

La longueur de la partie en porte-à-faux dépend du mode de construction et de la profondeur de la mer ; les blocs étant posés en retrait, ceux de l'assise inférieure sont très en avance sur la portion terminée ; d'où la nécessité de l'allongement de la volée.

Les blocs inférieurs, étant maintenus par le poids des assises qui les recouvrent, peuvent être de plus petites dimensions que les autres. Cette précaution a pour conséquence de diminuer le moment de la charge à l'extrémité du bras.

Soulèvement des blocs. — Le soulèvement des blocs s'effectue par divers moyens. Aux travaux du môle Carnot, les chaînes de suspension passaient dans deux rainures pratiquées à la face intérieure du

bloc. A la Tees, les attaches s'enroulaient autour de deux traverses en bois noyées à mi-hauteur des faces latérales. Le plus souvent, le bloc est percé de deux cheminées centrales terminées à la base par une cavité plus large où est ajusté un morceau de bois dur fendu longitudinalement. Des barres de fer pénètrent dans ces cheminées ; elles sont terminées par un T qui, après être entré par la fente, est tourné transversalement. L'extrémité supérieure des barres est munie d'un œil que saisissent les mâchoires d'un palonnier suspendu au titan et percées également d'un trou où entre une broche.

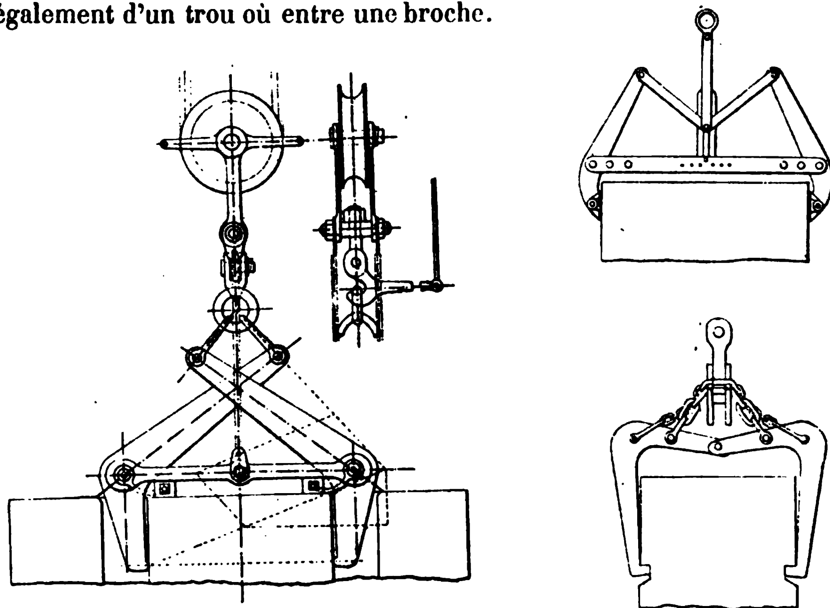


Fig. 258. — Pose des blocs.

Quand le bloc est rendu à sa place, on enlève les broches et les barres sont tournées et retirées.

On se sert également de la louve et de diverses sortes de tenailles agissant par frictions sur les côtés ou s'engageant dans des cavités latérales (fig. 258) ; ces appareils sont appliqués surtout dans les mers trop agitées pour qu'un plongeur y descende. Le système représenté figure 258 *bis* s'explique de lui-même ; il pénètre dans une cavité en forme de tronc de pyramide renversé. Le bloc en se posant lâche le palonnier ; le frottement cessant, l'ensemble est enlevé.

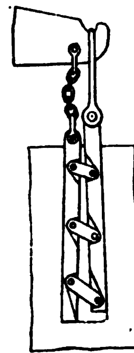


Fig. 258*bis*.

La figure 259 indique le procédé employé à la Pointe

des Galets afin de pencher le bloc pour le poser avec l'inclinaison voulue. Celui-ci était enveloppé d'une double ceinture de chaînes, dont une extrémité était fixée à des tasseaux passés dans les cheminées verticales ; l'autre extrémité passait sous le bloc et s'attachait à la vis d'un vérin. Le rappel de cette vis ramenant la chaîne, le bloc s'inclinait.

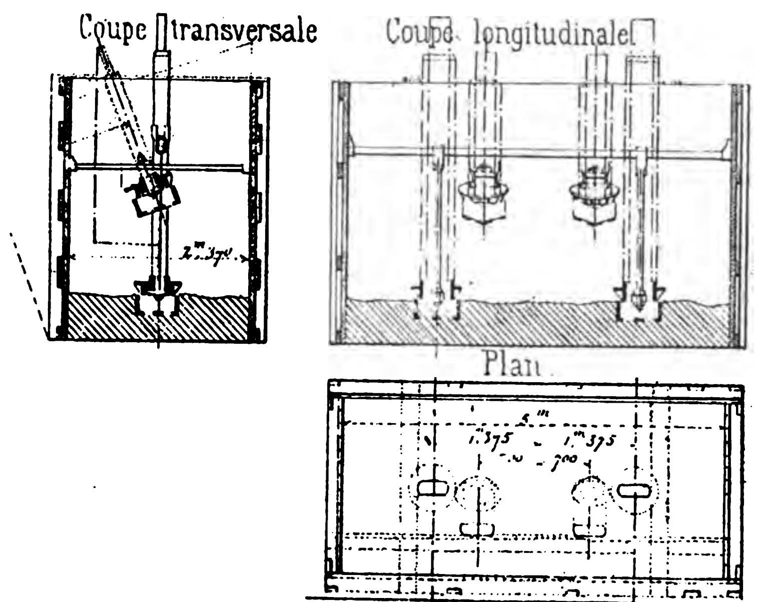


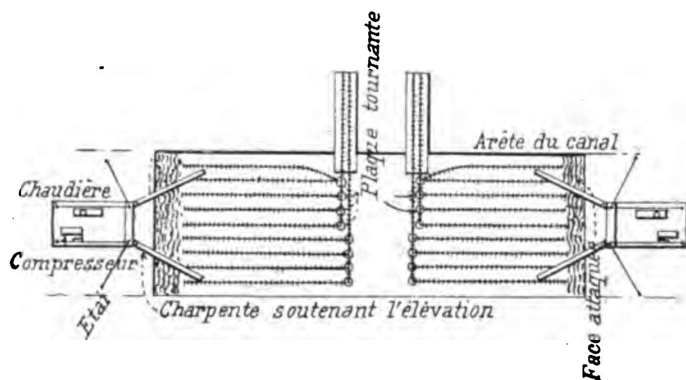
Fig. 259 — Pose oblique des blocs. Pointe des Galets.

L'attache par grappins ne vaut pas celui par barres ; une fois le bloc posé par les premiers, il est presque impossible de le reprendre, et pourtant il est souvent nécessaire de le relever pour le placer exactement. Il vaut donc mieux, si les circonstances particulières ne s'y opposent pas, employer le second procédé qui permet la pose avec une exactitude presque mathématique.

Lorsque les blocs sont posés jointifs, la prise par grappins extérieurs n'est pas possible ; on a tourné la difficulté à Mormugaõ en ménageant sur la face supérieure une rigole dans laquelle s'engagent les pinces. Mais la difficulté de reprendre les blocs est encore augmentée par ce procédé.

Malgré toutes les précautions, les blocs posés par assises inclinées tendent souvent à se coucher et à diminuer la pente du talus ; il est nécessaire de corriger ce défaut en fabriquant des blocs moins épais à

la base. L'expérience seule peut renseigner à cet égard ; mais l'attention doit être éveillée sur ce point, afin que la fabrication soit conduite en conséquence.



Plan.

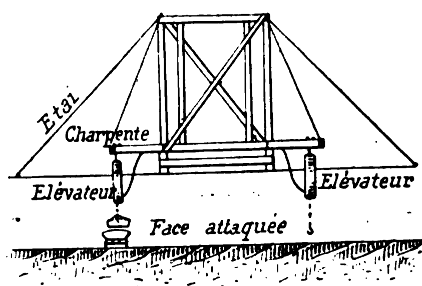


Fig. 260. — Lève-blocs du Chicago.

Pour charger les blocs au canal de Chicago, on se servait d'un élévateur à air comprimé, dont la figure 260 représente l'élévation et la coupe. Un cylindre suspendu à une charpente contient un piston sous lequel on fait arriver l'air en charge : les blocs élingués sont attachés à l'extrémité de la tige du piston et suffisamment relevés pour qu'on puisse faire arriver au-dessous le chariot-verseur. Le cylindre est porté sur un trolley et peut, en conséquence, se déplacer.

COULAGE DU BÉTON SOUS L'EAU

En thèse générale le coulage sous l'eau du béton au ciment de Portland doit être évité. Il est très maigre et n'a pas l'adhérence que donne le ciment romain. En France, ce procédé n'est guère employé.

Dans les fondations par épuisement, pour mettre le béton à l'abri du contact de l'eau, on creuse auprès de la tranchée des puits de

4 mètres de côté et de 2 mètres plus profonds que la fouille et l'on y dirige par un drain de 15 à 20 *cm* de diamètre les eaux de filtration qu'enlève une pompe. Ces puits sont espacés le long de la tranchée selon les besoins. Il est bon de n'arrêter les pompes que lorsque la prise du béton est complète.

Au canal de Manchester où cette précaution a été prise, le jeu des pompes n'a été suspendu qu'au bout de plusieurs mois de durcissement du béton.

Le béton au ciment de Portland ne se coule guère au talus dans la mer, la profondeur d'immersion étant généralement trop grande. Il est en général posé par des bennes à fond mobile, représentées par la figure 261. La contenance doit être aussi grande que possible, afin d'éviter le délavage des portions déposées, mais la benne doit rester maniable. Le versement se fait rapidement, pour la même raison, mais le mouvement de la benne à travers l'eau ne doit pas être trop rapide.

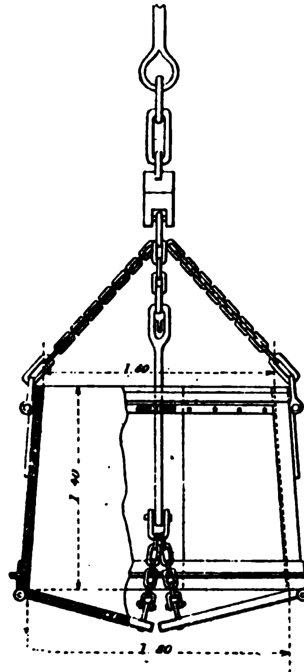


Fig. 261. — Benne de Bilbao.

M. Heude s'est servi d'un tube en planches, de 40 *cm* de côté, dont

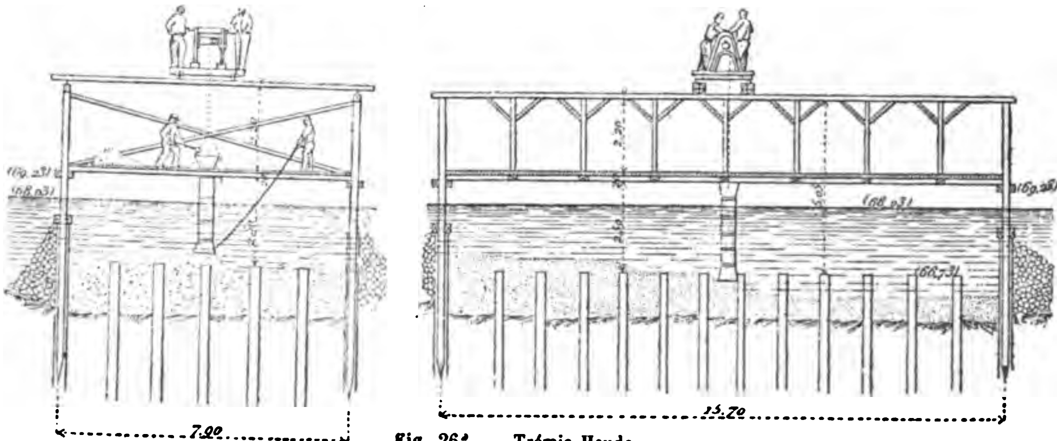


Fig. 262. — Trémie Heude.

la partie inférieure repose sur le fond tandis que l'autre extrémité dépasse le niveau de l'eau. Le tube plein est légèrement soulevé par

un treuil; le béton s'écoule et est remplacé à mesure, de façon que le tube reste constamment rempli; le délavage est ainsi évité (fig. 262).

Le béton se dépose par couches de 30 à 40 *cm* d'épaisseur; avant d'en déposer une nouvelle, la surface de la précédente est soigneusement nettoyée et brossée.

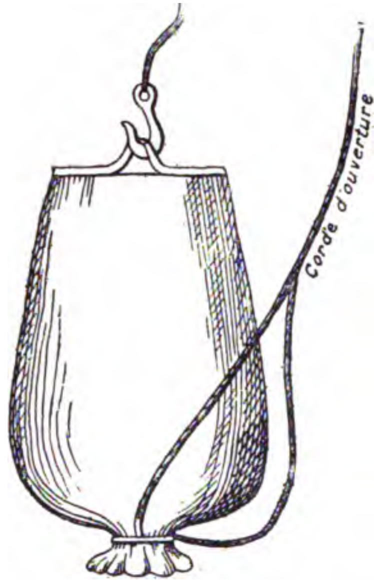


Fig. 263. — Sac à couler le béton.

M. Shield, pour couler le béton sous l'eau, emploie un sac contenant environ 70 litres, cousu et attaché à un crochet à l'une de ses extrémités, ouvert de l'autre. Le béton est introduit par cette ouverture, le sac se ferme par un seul tour d'une corde munie de boules où passe une cheville en bois, qui serre le joint et est enlevée par une cordelette quand le sac est à fond. La perte de ciment par ce procédé est très réduite (fig. 263).

En Angleterre, on emploie plus volontiers le béton coulé sous l'eau. Quelques ouvrages ainsi exécutés sont célèbres.

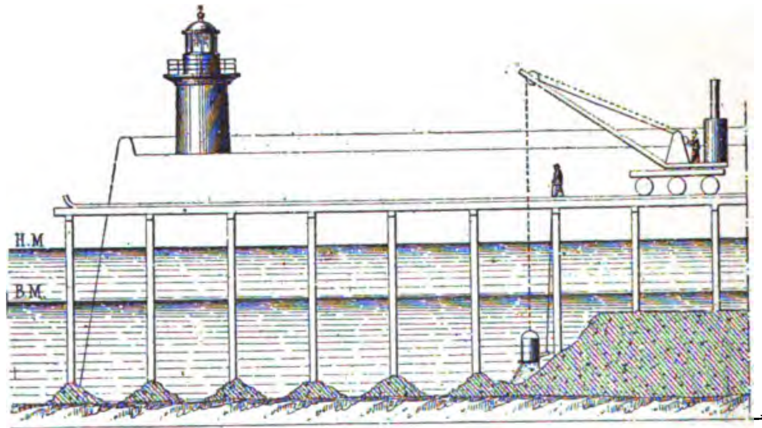


Fig. 264. — Wicklow. Élévation latérale.

Coulage du béton sans caissons. — *Wicklow* (fig. 264) 1881-1884. — Le môle de Wicklow a 230 mètres de longueur et atteint les

profondeurs de 5,50 m; il a été construit au moyen d'un échafaudage central portant deux voies ferrées et avancé à mesure des besoins; les nouveaux pieux étaient placés par une grue marchant sur le môle terminé.

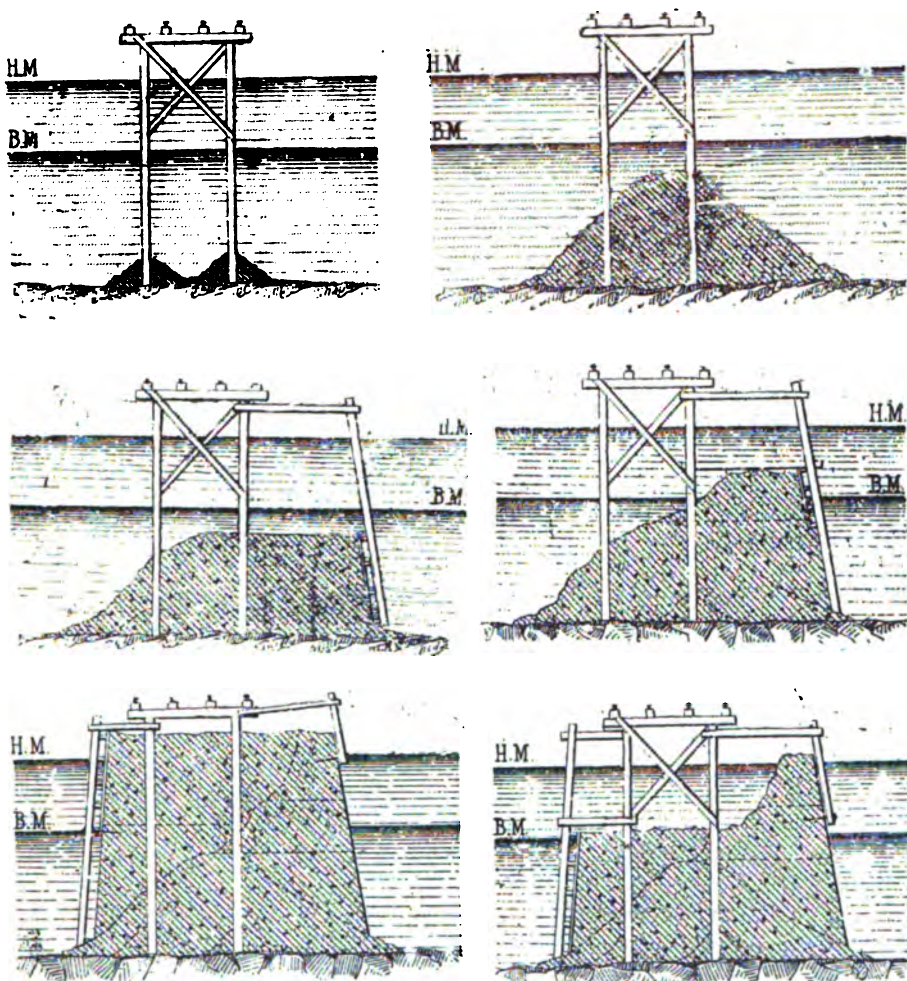


Fig. 264. — Môle de Wicklow.

Les montants n'étaient pas enfoncés; la stabilité était assurée par un dépôt à leur pied de 60 à 80 tonnes de béton apporté par des bennes sur wagonnets et versé par une grue.

On déposait ensuite un fort pâté de béton qui élevait le môle aux 2/3 de la hauteur au-dessous des basses mers; le versement était achevé

entre des panneaux posés sur des pieux inclinés suivant le fruit du mur à construire.

Les figures indiquent les phases successives du travail et montrent que la surface des panneaux était très réduite, car le béton était posé en deux assises de chaque côté du pâté central; quand la première était prise, on relevait le panneau et l'on coulait la seconde.

On a pu par ce procédé placer jusqu'à 190 mètres cubes de béton par jour, quantité considérable pour un petit ouvrage comme le môle de Wicklow.

Le système a bien réussi, le mortier a été peu délavé. Le béton en masse a l'avantage de se mouler sur le fond de la mer qui à Wicklow était rocheux sur une grande étendue. Les lézardes qui auraient pu se produire dans un mur aussi long ont été prévenues par l'intercalation, tous les 12 mètres, de panneaux en croix partageant le môle en portions isolées, blocs énormes sur lesquels la mer n'a pas d'action.

Il est essentiel, pour le succès de la méthode, de descendre le béton jusqu'au fond par des bennes, qu'on relève lentement; le dépôt doit être rapide.

Buckie. — A Buckie, le béton a été déposé dans des caissons en bois doublés de toiles de jute; on opérait par longueurs de 10 mètres; le béton était projeté par des wagons à bascule dans une profondeur de 2 à 3 mètres d'eau, ce qui n'est pas une méthode à recommander. Quant à la protection par des toiles, elle est très efficace.

Skinningrove (fig. 265). — Le fond de la mer est de l'ardoise recouverte de sable qui était enlevé sur une longueur de 7,50 *m* et une largeur de 12 mètres, par une pompe à double tuyau d'aspiration dont l'un prenait le sable, l'autre de l'eau pour diluer les matériaux et empêcher l'engorgement. Dans le fossé ainsi creusé, le béton était coulé au moyen de caisses de 600 litres environ, manœuvrées par une grue à vapeur de 5 tonnes, qui s'avançait sur les portions du môle déjà construites. Cette base de béton étant élevée jusqu'à 30 *cm* audessus du niveau de basse mer était nivelée et pilonnée par un plongeur et avait alors 2 mètres d'épaisseur. On y élevait un moule de charpente, où le béton était coulé comme d'ordinaire.

Le travail a toujours été possible tant que la hauteur des vagues ne dépassait pas 1,20 *m*, ce qui se présentait 144 jours par an. Après vingt-

quatre heures de coulage, la masse subissait sans avaries le choc de vagues de 4,50 *m* de hauteur. Les dégâts ont été insignifiants.

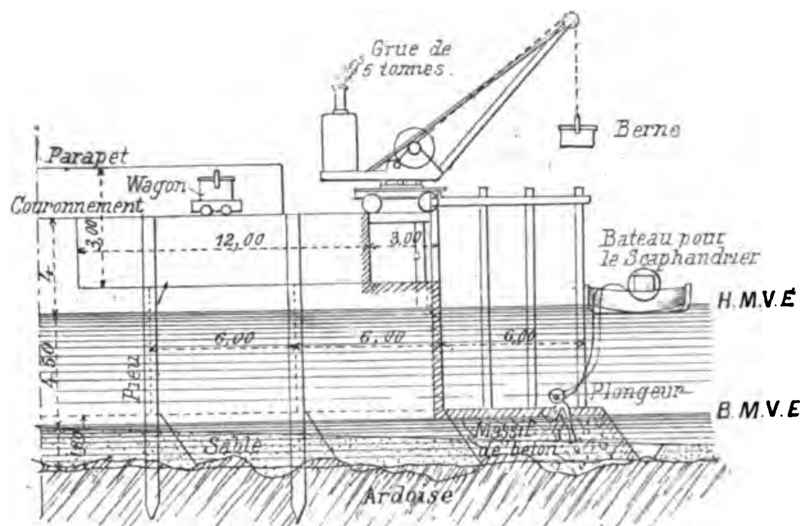


Fig. 265. — Skinningrove. Méthode de construction.

Après achèvement, les plongeurs ont enlevé intérieurement la partie dépassante de la base.

Pose des blocs en sacs. — La méthode a été employée successivement à *Alberdeen, Fraserburgh, Newhaven, la Guayra, Ardrossan*, etc.

Les sacs de béton dans les deux premiers ports pesaient 50 tonnes, à Newhaven 100 tonnes et à la Guayra 160 tonnes.

Newhaven. — Un bateau métallique, muni d'une hélice (fig. 266), porte dans son milieu une chambre ayant 12,75 *m* de longueur moyenne, 2,45 *m* de largeur et 1,85 *m* de hauteur, soit un volume de 58 mètres cubes. Les dimensions horizontales sont un peu plus grandes en bas qu'en haut, pour faciliter le déchargement ; le fond est fermé par deux clapets, actionnés par un treuil à vapeur, et qui peuvent s'ouvrir sans dépasser les bords inférieurs du bateau.

Dans cette chambre s'étale un sac en jute, ouvert par le haut, dont l'épaisseur est simple au fond, double sur les côtés et au sommet, et beaucoup plus grand que la chambre, pour permettre au béton de s'épandre sans avarie.

Le bateau se place dans l'intérieur du port sous une bétonnière Carey-

Latham, qui remplit le sac en 20 minutes. On coud la partie supérieure pendant le voyage au môle.

Au point de pose, on ouvre les clapets et le sac descend à sa place en se moulant sur le fond ou sur les autres blocs déjà posés.

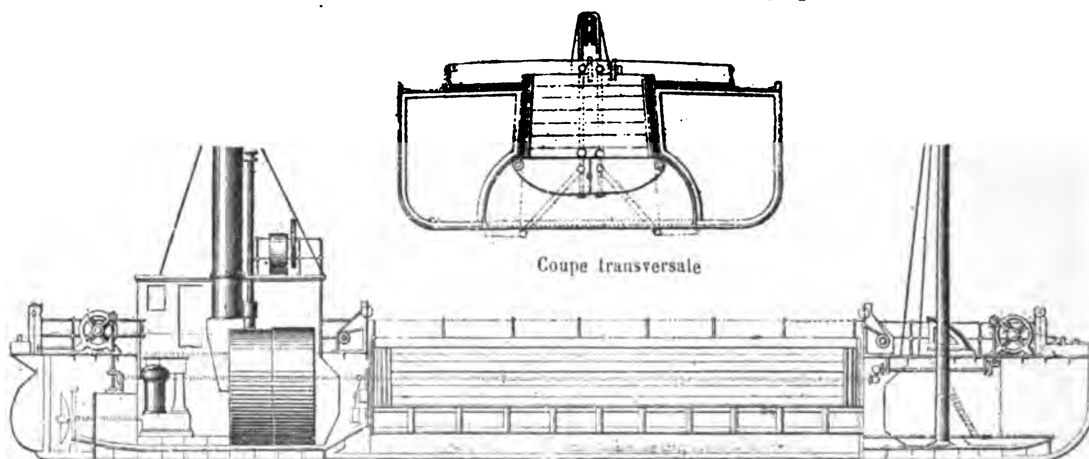


Fig. 266. — Chaland de Newhaven. Coupe longitudinale.

Les fondations étaient ainsi élevées à la marée haute jusqu'à 60 *cm* au-dessus du niveau de la basse mer, puis la surface était nivelée et surmontée de caisses en bois, dans lesquelles se coulait le béton de la superstructure, dont la hauteur est de 3 mètres au-dessus de la haute mer.

Le succès de ce procédé dépend absolument de la rapidité de fabrication du béton, car il doit être déposé aussi vite que possible; autrement, si la prise est commencée, le bloc se brise.

La Guayra, Venezuela. — A la Guayra, la construction du môle en béton était obligatoire; la pierre n'existait pas dans les environs, tandis qu'on trouvait le galet sur la plage. L'usage des blocs était impossible car il n'y avait aucun espace disponible pour les emmagasiner, le môle s'enracinant à l'extrémité de la principale rue de la ville. On adopta donc le système du béton coulé en sacs, mais avec une modification nécessitée par la très faible amplitude de la marée. Dès que le chaland-verseur ne pouvait plus passer par-dessus les blocs posés, on recourait à un chariot-basculeur, dont l'intérieur était disposé pour recevoir les sacs de jute, et qui s'avançait sur les portions construites (fig. 267).

Les blocs de la fondation, posés par chaland, avaient $14{,}60 \times 2{,}75 \times 1{,}80$ *m*; la contenance était donc de 72 mètres cubes et le poids du

Fig. 267.

Projecteur de blocs

de

La Guayra.

bloc de 160 tonnes. On montait ainsi jusqu'à la cote — 6 mètres. De — 6 mètres à — 3 mètres les blocs pesaient 130 tonnes. Ceux que projetait le chariot étaient de 70 tonnes; ils mesuraient 10 mètres de longueur. Au-dessus du niveau de la mer, la superstructure consiste en un mur de béton construit dans un moule en charpente revêtu de toile de jute.

Le môle a atteint les profondeurs de 14 mètres.

Ardrossan. — Les sacs-blocs ont été construits dans des caisses à clapet en bois, longues de 8 mètres, larges de 2 mètres et hautes de 1,20 *m*, placées sur des chalands à vapeur. Un autre chaland portait des bigues qui reprenaient les caisses et les abaissait jusqu'au fond où le clapet s'ouvrait au commandement d'un plongeur. Les sacs étaient posés en parpaings, et diminuaient de longueur à chaque assise; on raccourcissait les caisses par des faux-fonds.

La confection du béton, le remplissage des caisses et l'immersion du bloc-sac ne prenaient que deux heures, on plaçait de 4 à 8 sacs par jour, et il en a fallu 866; leur poids moyen était de 34 tonnes.

Pour déposer les sacs de béton d'un poids ordinaire, M. Shield a adopté la disposition représentée par la figure 268.

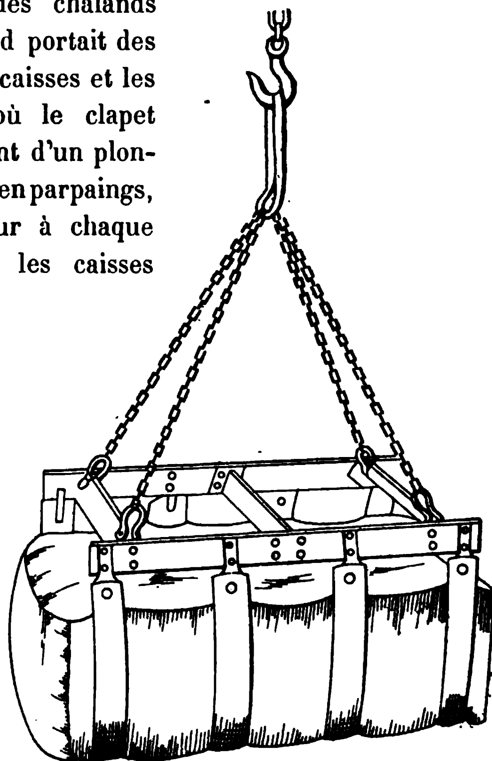
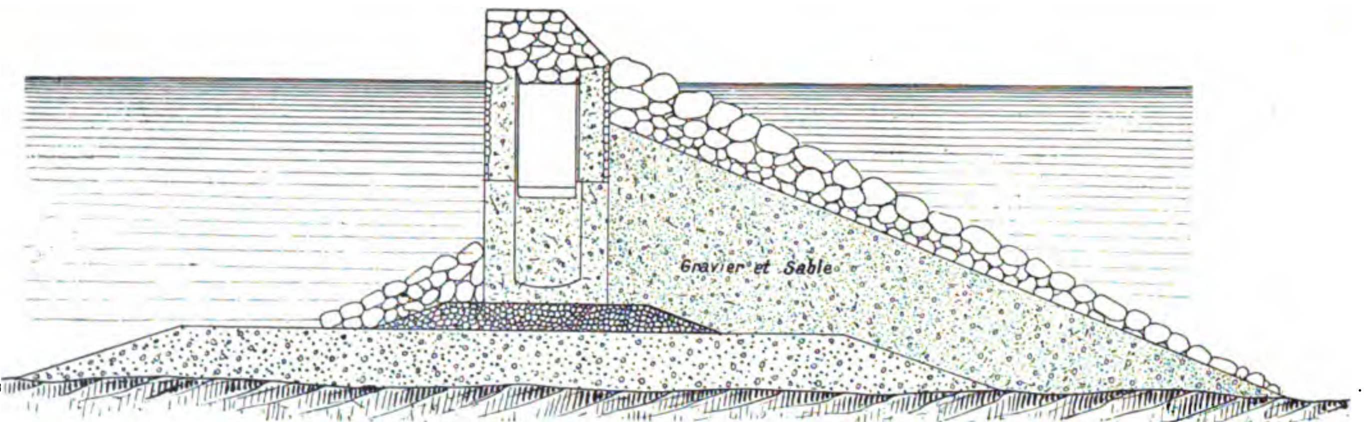


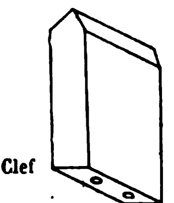
Fig. 268. — Appareil à déposer les sacs.

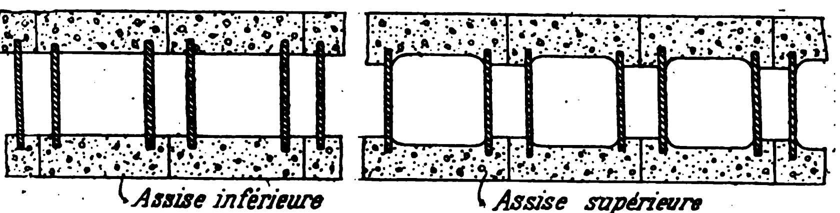
PROCÉDÉS DIVERS

Copenhague (fig. 269) 1891-1894. — La digue du port franc a été construite en blocs artificiels d'un système particulier nécessité par l'obligation de se servir de la grue-bigue du port, qui ne pouvait soulever que 35 à 40 tonnes. Les blocs ont été fabriqués creux afin de ne



Copenhague, coupe par les grands fonds.





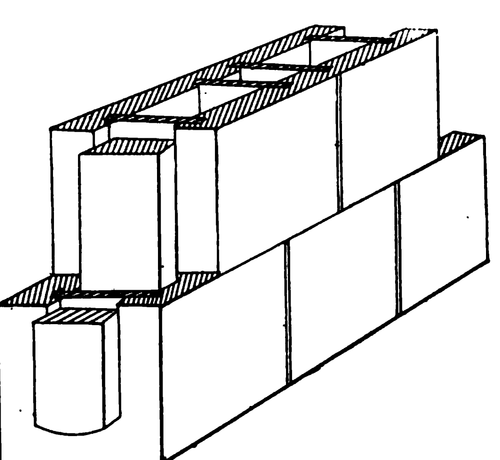


Fig. 269. — Copenhague. Plan. Élévation.

pas dépasser ce poids, tout en ayant la plus grande longueur possible. La profondeur, dans une portion de l'espace occupé par la digue, avait de 3,13 *m* à 3,44 *m*; comme on voulait que le bloc arrivât au niveau de la mer, afin d'établir à sec la superstructure, cette hauteur de 3,13 *m* fut adoptée pour celle du bloc, qui reçut la même dimension transversale ; avec les dispositions de construction, on put avoir ainsi une longueur de 2,51 *m*.

Le bloc est construit en forme de canal ouvert aux extrémités dont la base a 3,13 *m*, la longueur 2,51 *m* et les deux parois verticales 3,13 *m* de hauteur totale. La base a 45 *cm* d'épaisseur, l'une des parois 79 *cm* et l'autre 66 *cm*. Le cube total est de 13,30 *m* et le poids de 35 tonnes.

Les parois sont réunies par deux tablettes en ciment armé de 6 *cm* d'épaisseur, encastrées durant la fabrication dans des rainures pratiquées dans la base et les côtés. Elles forment tirants et concourent à la solidité.

Les blocs sont en béton, mais leur partie supérieure est parementée en granite noyé dans la masse.

Le bloc repose sur le fond lui-même ou sur un léger enrochement bien nivelé, suivant les profondeurs, jusqu'à 3,44 *m*. Une fois en position, l'espace entre les tablettes est rempli avec des déblais de dragage, en laissant vide une hauteur de 30 *cm*, dans laquelle pénètre la maçonnerie de superstructure, qui assure la liaison.

Les deux tablettes d'un même bloc étant éloignées de 1,70 *m*, il reste de chaque côté un espace de 34 *cm*. Il en résulte que l'intervalle entre les tablettes de deux blocs contigus est de 68 *cm*. On force dans cette cavité des clefs en béton qui relient invariablement deux blocs voisins; ces clefs laissent également au-dessus d'elles un espace de 30 *cm* que remplit la maçonnerie de superstructure.


Fig. 270. — Grappin pose-blocs

Les plaques en béton armé sont formées d'un réseau en fils de fer ronds, dont les horizontaux ont 7 et 10 *mm* et les verticaux 5,5 *mm* de diamètre. Les blocs sont construits dans des moules.

Les blocs étaient posés par le grappin représenté par la figure 270.

Sur une autre partie de la digue, la profondeur d'eau est de 7,50 *m*.

Elle est réduite à 5,50 *m* par un enrochement sur lequel est posé un premier rang de blocs creux que l'on remplit comme ci-dessus ; au-dessus, on place, à joints contrariés, une deuxième rangée de blocs semblables aux premiers, sauf qu'ils n'ont pas de fond et que leur hauteur n'est que de 2,80 *m*. Une clef réunit de même les blocs contigus ; on les fait pénétrer de 40 *cm* dans l'assise inférieure, de façon à réunir fortement l'ensemble [1].

Heyst (fig. 271). — Les blocs de 3000 tonnes du port de Heyst sont fabriqués creux et par conséquent flottables ; on les remorque à leur place et on les remplit de béton.

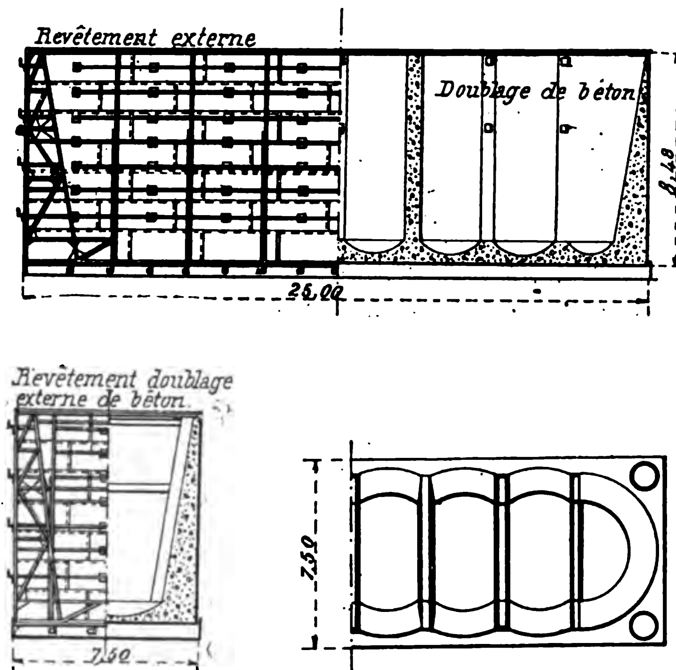


Fig. 271. — Blocs de Heyst.

Ils sont établis dans des caissons en tôle, montés par files régulières de cinq et formés d'une ossature bordée de tôle. On les remplit de béton après y avoir disposé des moules destinés à ménager les vides qui permettent au bloc de flotter.

La pose des fers, du béton et des moules s'opère chacune au moyen d'un pont roulant distinct, qui passe au-dessus des caissons.

(1) Les renseignements sur les travaux de Copenhague sont dus à l'obligeance de M. V. Möller, ingénieur en chef.

Ceux-ci sont construits dans le bassin d'arrière port, qui commu nique avec la mer par une écluse et un chenal. Ce bassin a 660 mètres de longueur sur 50 ; une fois les blocs terminés, l'eau sera admise dans le bassin; les caissons flottants seront remorqués et échoués à leur place à basse mer ; on les remplira alors de béton.

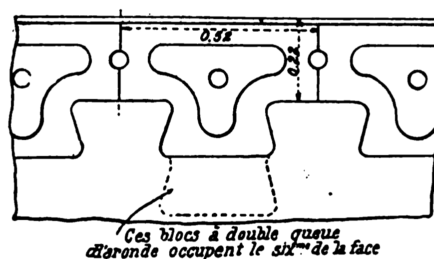
Cableways. — Le système a été proposé par le major Raymond pour la pose des blocs nécessaires à la fermeture de la passe entre les deux digues de la Delaware. Cette passe a 412 mètres de largeur ; elle aurait été divisée en deux parties par un îlot formé d'un grand crib rempli de pierres. Les tours devaient être établies d'une part sur cet îlot, de l'autre sur l'extrémité de chacune des digues. On eût de cette façon posé des blocs de 30 tonnes. La dépense de l'installation n'était estimée qu'à 200 000 francs.

Ce projet a été rendu inutile par la modification apportée à la construction du mur qui a relié les digues.

Procédé Kinipple. — Un ingénieur anglais, M. Kinipple, a construit à *Girvan* (fig. 272) un môle suivant un principe tout à fait spécial. Pour lui, le seul moyen d'empêcher le délavage du béton par l'eau, c'est de l'employer à l'état *plastique*, c'est-à-dire quand il a acquis la consistance de l'argile dure, par suite d'un commencement très manifeste de prise. Le meilleur mode est d'opérer le mélange des matières avec le minimum d'eau, de le pilonner dans des caisses où il séjourne de deux à quatre heures avant d'être coulé sous l'eau. Parfois même le délai est plus considérable ; mais des expériences ont démontré que le béton employé après dix-huit heures de malaxage a perdu la moitié de sa résistance. Il convient enfin, s'il existe des courants ou des vagues, d'ajouter à la matière une petite quantité de ciment à prise rapide, au moment de l'emploi.

Au môle de Girvan, le béton plastique avait d'abord été coulé dans des caissons en charpente, avec bordage à languette et rainure, mais l'agitation était encore trop grande. On construisit alors, sur un massif en béton coulé en place, des enceintes de 5 mètres de longueur, d'un mètre de hauteur et de la largeur du môle, au moyen de blocs de béton. Ces blocs ne pesaient que 80 kilogrammes et par conséquent 36 kilogrammes environ dans l'eau, ils étaient donc maniables. Ils portaient à la partie inférieure un tenon pénétrant dans une mortaise pratiquée dans la face du bloc placé au-dessous, et latéralement ils étaient dé-

coupés en queue d'aronde, de façon à se relier avec le béton qu'on coulait dans l'enceinte. Les blocs étaient aussi perforés de cavités dilatées où s'étendait le béton, disposition qui assurait une liaison parfaite ; la couche d'un mètre, terminée en une marée, était recou-



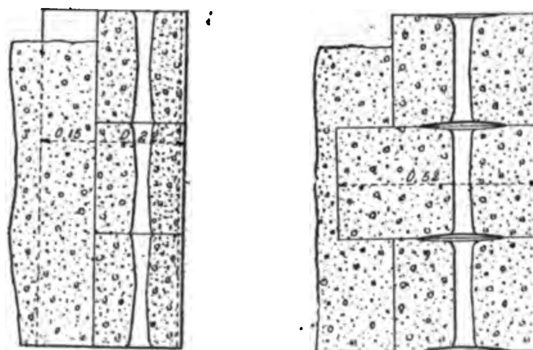


Fig. 272. — Girvan.

verte d'un pavage exécuté au ciment à prise rapide, qu'on retirait à la marée suivante ; le mur a été ainsi élevé jusqu'à 2 mètres au-dessus des hautes eaux.

A *Wick* (fig. 273), le musoir du môle sud, détruit par une tempête, a été reconstruit en blocs de 60 à 140 tonnes, fabriqués en place dans une caisse bordée d'une toile à voile relevée en forme de sac et où se déposait le béton plastique ; le bloc terminé, les bords de la toile étaient repliés et maintenus par des gueuses jusqu'à prise complète.

Le succès de ces ouvrages a déterminé l'auteur à proposer l'extension du procédé dans toutes les conditions de mer et d'exposition, le béton étant coulé à l'abri d'un bouclier, qui parait peu pratique.

Un autre procédé employé et préconisé par M. Kinipple consiste

dans la fabrication des monolithes par l'injection d'un coulis de ciment.

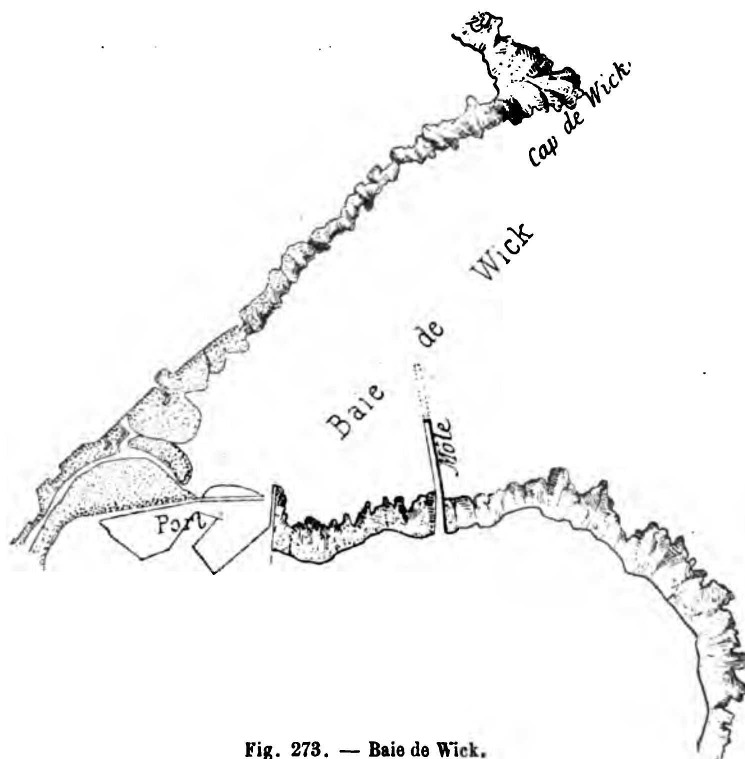


Fig. 273. — Baie de Wick.

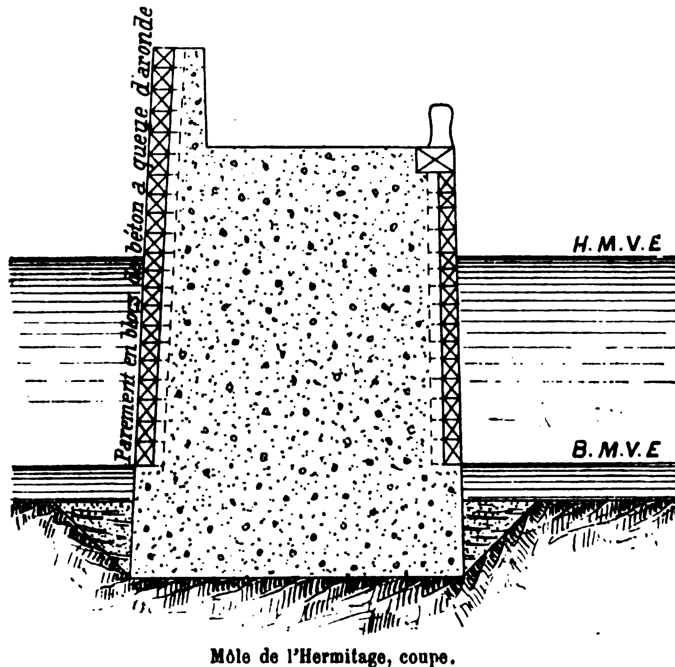
Môle de l'Hermitage. — Le môle de l'Hermitage, à Jersey, a été construit à deux époques différentes : une première partie de 1873 à 1877 par sir John Coode, sur une longueur de 175 mètres ; la seconde, longue de 160 mètres, de 1887 à 1889, par M. Kinipple (fig. 274).

La portion primitive est du type par assises inclinées et avait subi des altérations ; nous allons d'abord décrire la construction de l'ouvrage de M. Kinipple, avant d'indiquer le mode de réparation de l'autre.

Le fond rocheux ayant été dragué et complètement nettoyé du sable qui le recouvrait, fut comblé par tranches de 3 mètres de longueur au moyen de moellons et de galets projetés d'un chaland. Ce substratum fut soigneusement nivelé par les plongeurs.

Des quatre côtés de la tranche trois étaient d'ordinaire bornés par les talus du sillon dragué ou par le mur déjà construit ; on limitait l'autre par des sacs de béton recouverts d'une toile imperméable ; au besoin, cette barrière était construite sur les côtés, quand l'épaisseur

de sable formant arrêt n'était pas suffisante. Elle avait pour but d'empêcher la perte du coulis de ciment qu'on injectait alors dans l'enrochement, au moyen d'un tuyau. Ce tube, muni supérieurement d'un entonnoir, partait d'une plateforme suspendue au bout du bras d'une grue mobile sur le môle lui-même.



Môle de l'Hermitage, coupe.



Fig. 274. — Plan.

Comme le substratum s'élevait à la même hauteur au-dessous du niveau de l'eau, la plateforme se tenait à la distance voulue pour que le tuyau conservât toujours la même longueur.

Le coulis se prépare avec du ciment très frais et aussi fin que possible ; il est coulé en pâte dure et continue ; il pénètre dans tous les interstices et fait de l'ensemble un monolithe. Le tuyau est souvent changé de position de façon à n'avoir à alimenter qu'une surface de 4 à 5 mètres carrés autour de lui.

Le temps nécessaire pour draguer la fondation, la préparer et la cimenter varie de 7 à 10 jours; la quantité du ciment injecté varie de un neuvième à un dixième du poids de l'enrochement.

Sur cette base est posée la superstructure composée de blocs en assises inclinées; ils ont comme dimensions :

Longueur : 2,75 et 3,65 *m.*

Largeur et hauteur : 1,20 *m.*

Ce sont les plongeurs qui exécutent la pose jusqu'au niveau de l'eau. Les blocs sont munis de rainures et tenons destinés à assurer leurs liaisons. Ils sont placés transversalement à la longueur du môle; il en faut donc trois pour remplir la tranche; la largeur du môle en exige aussi au moins trois; chaque assise comporte par conséquent neuf à dix blocs. Quand deux assises sont posées, les joints extérieurs sont bouchés par de la toile imperméable et l'injection du ciment est effectuée entre les joints supérieurs, à l'aide d'un bourroir en bois qui pousse le coulis dans le tuyau.



Fig. 275 et 276.

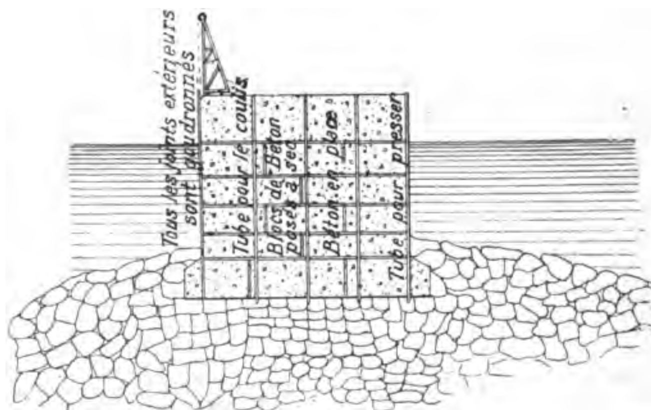


Fig. 277. — Réparation de l'ancien môle de l'Hermitage.

Les parements sont protégéspar un revêtement de granite.

La portion antérieure du môle a été réparée par le même procédé.

Elle avait été construite en blocs inclinés, de 50 à 90 tonnes, sur base de blocs-sacs. Les avaries avaient pour cause la largeur des joints ; il fallait donc les combler. On a commencé par fermer les joints extérieurs. Ceux des côtés ont été calfatés à la façon d'un bordage en madriers. Ceux de la face supérieure ont été comblés de galets ; puis, dans une cavité pratiquée en queue d'aronde, on a disposé un bouchon de ciment pur, qu'il fallait même maintenir par une planche pressée au-dessus des rigoles trop larges (fig. 275 et 276).

Des tubes pénétrant dans les joints aussi profondément que possible, et en plusieurs points, servaient à l'injection du coulis du ciment qui pénétrait dans toutes les crevasses et a rendu l'ouvrage monolithique. Bien que d'ordinaire il ne faille point compter sur le remplissage que d'une dizaine de mètres carrés autour du tuyau, dans ce cas, le ciment s'est épanché jusqu'à 12 mètres de distance (fig. 277).

EXPLOITATION DES CARRIÈRES

Les enrochements nécessaires aux ouvrages extérieurs des ports sont d'ordinaire tirés de carrières voisines, reconnues et expérimentées à l'avance au point de vue de la quantité et de la qualité des matériaux.

A Buenos-Ayres, les carrières exploitées se trouvaient de l'autre côté de l'estuaire de la Plata, sur le territoire de l'Uruguay.

Les petites mines sont souvent plus avantageuses que les grandes, auxquelles on n'a recours que si les exigences du travail nécessitent de forts volumes de matériaux.

Petites mines. — Les trous des petites mines sont creusés à la main, au fleuret, ou mécaniquement à l'aide des nombreuses perforatrices connues. Pour les roches tendres et demi-dures nous avons toujours trouvé plus d'avantages aux machines rotatives.

Le choix de l'emplacement, de la direction, de la profondeur des trous de mine, a une grande influence sur les résultats. Dans un massif compact, dont une seule face est dégagée, l'explosion produit un cône dont les déblais sont projetés, ce qui crée des parois isolées sur deux sens pour les mines suivantes.

La distance du fond du trou de mine, par conséquent de la charge, à la paroi libre voisine, s'appelle la ligne de moindre résistance h. En général, la profondeur l du trou est forée de façon que $l = 1{,}5$ à $2\ h$.

Le diamètre du trou est en proportion de la profondeur ; on prend souvent le diamètre

De 25 *mm*	pour les profondeurs de	1 à 2	mètres.
45 —	—	2 à 3	—
60 —	—	3 à 4	—

La charge de dynamite n° 1 se calcule par la formule :

$$C = \frac{2}{3} m h^3$$

dans laquelle m est un coefficient variable de 0,40 à 1 selon la dureté de la pierre. Cette charge est réduite de un sixième si les parois du rocher sont libres. La profondeur du trou est calculée de façon que la charge en occupe le quart inférieur.

Une heure de perforation donne en général les longueurs suivantes de trous :

	A la main (trou de 25 mm.)	A la machine (trou de 50 à 75 mm.)
Pierres froides.......	0,18 *m*	0,90 *m*
Granite.............	0,50	2,00
Ardoise	0,60	2,50
Grès...............	0,70	2 à 3

La consommation de dynamite dépend de la dureté des roches. Un kilogramme du n° 1 fait sauter en moyenne 4 mètres cubes de granite.

Les cartouches de dynamite sont explosées par des capsules fulminantes auxquelles mettent le feu des mèches Bickford, qui brûlent à raison de 1 mètre à la minute, ou par l'électricité. Celle-ci offre l'avantage de l'explosion simultanée de plusieurs mines, dont l'effet est considérablement augmenté.

Le choix de la qualité de dynamite diffère suivant le but de la mine. Si l'on n'a en vue que la production d'un fort cube de déblais, les plus puissantes sont avantageuses (dynamite n° 1 et dynamite-gomme). Mais l'exploitation des carrières a surtout pour but, dans les travaux maritimes, la production de gros blocs ; alors, principalement pour les grandes mines, on a intérêt à se servir de la dynamite n° 3, moins rapide. Quant à la poudre ordinaire, elle est de beaucoup moins productive et économique.

En Angleterre, on emploie beaucoup la gélignite, qui est une sorte de dynamite-gomme moins puissante. Tandis, en effet, que celle-ci contient 20 % d'absorbant contre 80 de gélatine explosive, la gélignite en renferme 35 %. Cet absorbant est un mélange de trois quarts de salpêtre et d'un quart de pulpe de bois.

Il y a une foule d'autres substances explosives, qui ne sont que des dérivés plus ou moins heureux de la dynamite. Celle-ci nous a toujours semblé supérieure à ses congénères.

Grandes mines. — Les charges se calculent comme pour les petites par rapport à la ligne de moindre résistance. En général, sur le bord de la mer, les carrières sont des collines rocheuses qui s'attaquent de front. Normalement à leur face pénètre une galerie de la longueur déterminée par le calcul selon la quantité d'explosif; de son extrémité, part une autre à angle droit, par conséquent parallèle au front et d'une longueur égale. Au bout est pratiqué un puits de 3 mètres de profondeur, qui reçoit la charge. Ces galeries, de directions différentes, ont pour but de gêner l'expansion des gaz; quelquefois on en creuse en zig-zag; un bon procédé également est la formation de galeries symétriques aboutissant à la galerie centrale; si les gaz arrivent jusque-là, ils se choquent et s'arrêtent (fig. 278).

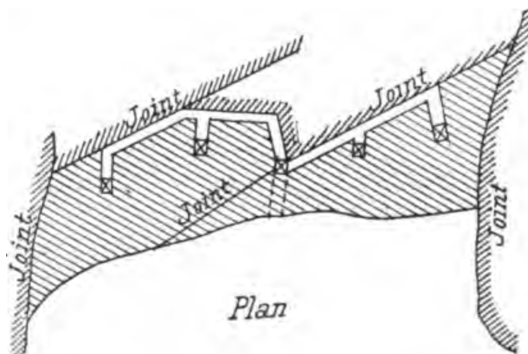


Fig. 278. Plan d'une grande mine.

Le puits est obturé par de la maçonnerie et les tunnels sont remplis de terre tassée. Le feu se met électriquement; il faut avoir soin de disposer plusieurs fils et amorces pour éviter les ratés.

A Marseille, des mines disposées en deux galeries symétriques et deux puits contenant chacun 3500 kilogrammes de poudre ordinaire ont produit jusqu'à 100000 mètres cubes de déblais.

A Holyhead, où les mines étaient chargées à la poudre ordinaire, la figure 279 indique l'une des dispositions adoptées.

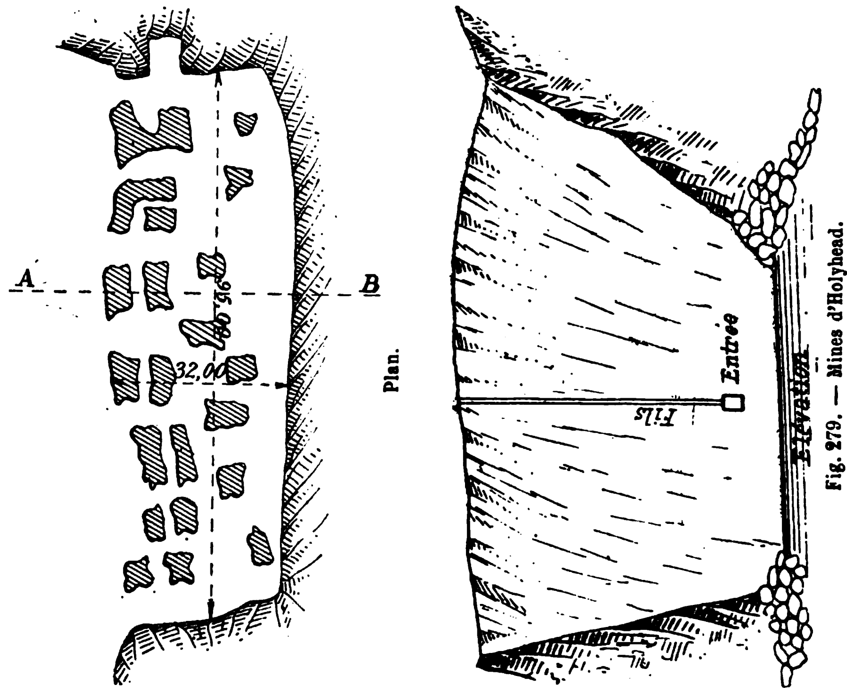


Fig. 279. — Mines d'Holyhead.

Fig. 279. — Coupe AB.

A Gênes, les carrières, situées près du quai d'embarquement du port, présentent un front d'exploitation très étendu et de 40 à 60 mètres d'élévation ; elles sont formées de calcaire à gros bancs ; la proportion entre la pierre utile et les débris ou la terre est de $\frac{55}{45}$. Quand les bancs sont bien réguliers, l'écroulement se produit par le creusement à leur base de nombreuses galeries à angle

droit et le sautage à la mine des piliers de soutien. Dans les bancs irréguliers on employait les grandes mines; la plus forte, chargée de 5200 kilogrammes de dynamite, fit ébouler 300000 mètres cubes de matériaux, sans secousses excessives ni danger pour le voisinage.

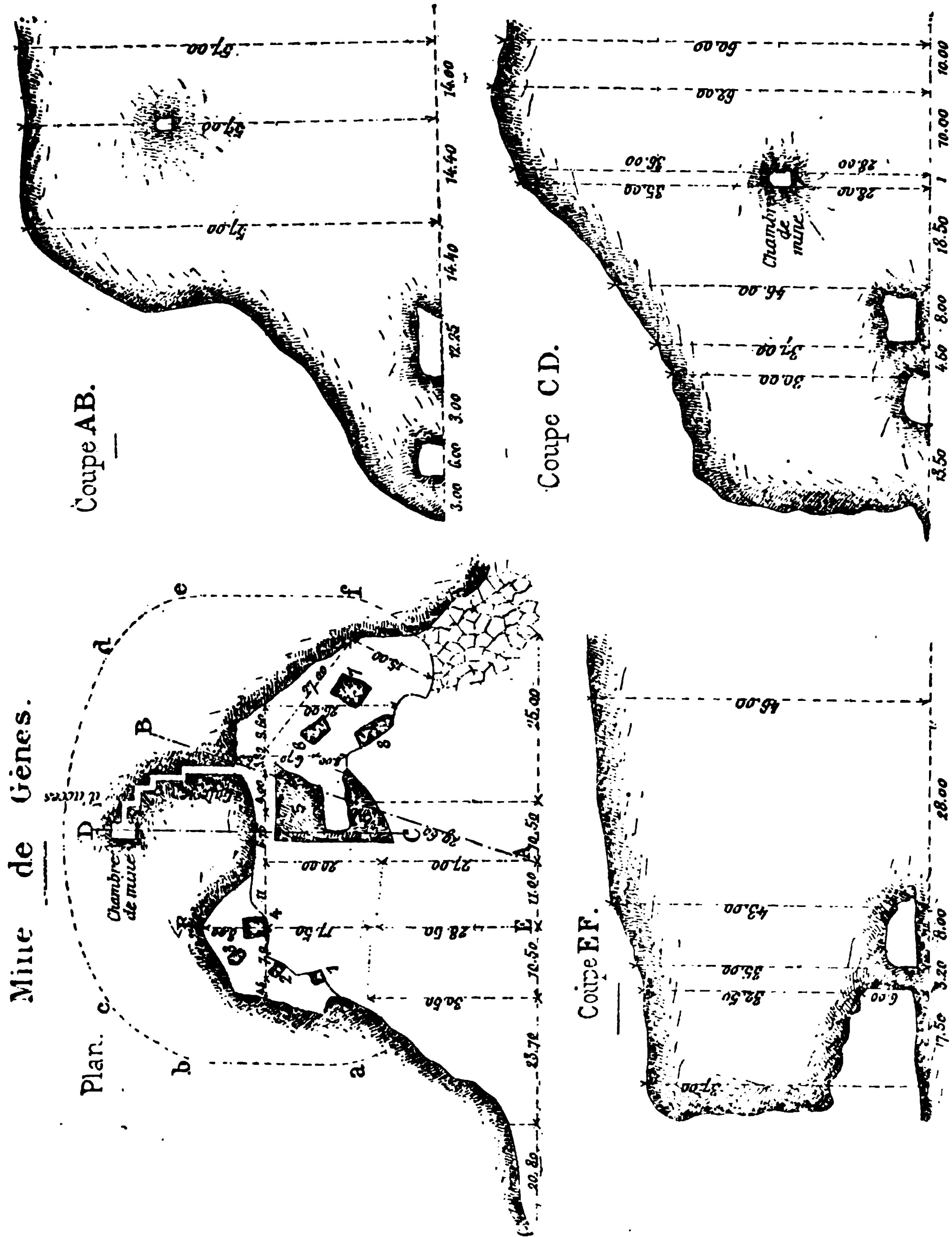


Fig. 280. — Mines de Gênes.

La figure 280 montre le plan et le corps d'une grande mine pratiquée à la Chiappella et qui donna 210000 mètres cubes de déblais. Le vide des galeries s'élevait à 10640 mètres cubes ; le plafond était soutenu par des massifs isolés cubant en totalité 3360 mètres ; 124 mines servirent à abattre les colonnes et la partie supérieure s'abîma en morceaux.

Westport. — La construction des môles de ce port de la Nouvelle-Zélande a exigé des grandes mines ; la figure 281 donne la disposition d'une qui a produit 40000 tonnes de matériaux, dont la moitié utilisable. En moyenne, 1 kilogramme de dynamite fournissait 22 tonnes de déblais dans le granite, le gneiss ou le grès. L'expérience a indiqué que les charges les plus utiles étaient celles d'un quart de tonne à une tonne et demie, la ligne de plus grande résistance étant au maximum de 12 mètres.

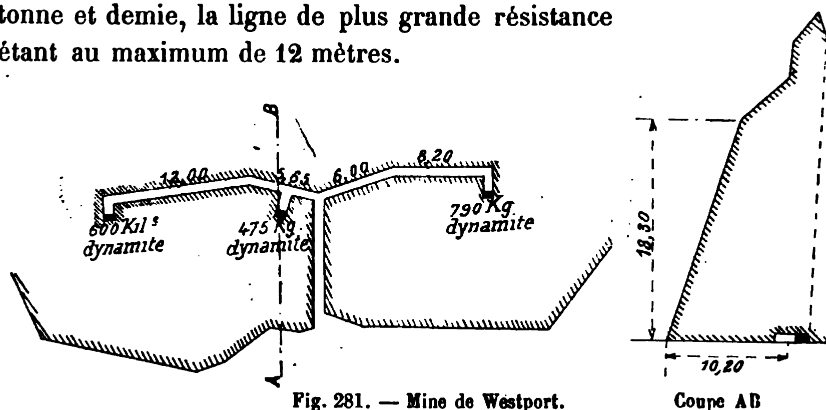


Fig. 281. — Mine de Westport. Coupe AB

Pour mettre le feu simultanément, au lieu de fils électriques on employait des mèches Bickford ; il y en avait une principale, brûlant comme toujours à un mètre par minute. Elle était reliée à des mèches instantanées, connues sous le nom de mèches sous-marines, qui se bifurquaient sur chaque charge et dont la vitesse de combustion était de 18 mètres par seconde. Il était facile de proportionner les longueurs pour obtenir des



Fig. 282.

explosions simultanées. Les figures 282 donnent le mode de réunion employé pour les mèches.

Construction hollandaise. — On pose un premier rang de fascines en brindilles de saule, réunies en bottes de 10 *cm* de diamètre et espacées de un mètre, de centre en centre. Ces bottes ont comme longueur la largeur du matelas, et les brindilles trop courtes sont réunies en les accrochant ensemble sur une longueur d'au moins 1,50 *m*. Sur ce premier rang on en dispose un second à angle droit et dont les bottes sont espacées de 90 *cm*. Les deux couches sont réunies aux intersections par des liens d'osier; de plus, on attache au rang inférieur des cordes goudronnées qui servent à serrer fortement ensemble toutes les couches une fois posées; elles sont maintenues en l'air pendant la construction, au moyen de pieux qui indiquent en outre la place des joints. Les intervalles entre les bottes du second rang sont remplies de brindilles isolées; après la pose d'un troisième rang transversal rempli et relié de même, on enlève les pieux et l'on serre fortement. Le matelas terminé a alors à peu près 50 *cm* d'épaisseur. Dans le remplissage du rang supérieur des vides sont laissés pour retenir les pierres de chargement.

Les matelas au Hoek von Holland avaient un minimum de 360 mètres carrés; les plus grands avaient 15 mètres de largeur sur 180 mètres de longueur (2700 mètres carrés).

Ils sont construits sur la plage, à haute mer puis flottés et remorqués à leur place, exactement repérée; ils sont alors chargés de pierres qui les font couler; il faut environ 600 kilogrammes de pierres par mètre carré.

Les môles n'ont été élevés qu'à la hauteur de mi-marée; leur partie supérieure est arrondie et pavée de grosses pierres. Ils sont consolidés par des pieux en chêne de 9 à 11 mètres de longueur, réunis ensemble à leur sommet; les côtés sont protégés aussi par trois rangées de pilotis.

Une fois terminé, l'ouvrage est recouvert par mètre courant de 60 à 70 tonnes de pierres d'un poids minimum de 50 kilogrammes, et de 500 à 1000 kilogrammes sur les bermes.

Le pavage sur ces bermes est ensuite effectué en pierre plates larges se recouvrant comme les ardoises d'un toit, en alignements parallèles à la longueur.

Cette disposition et la précaution de n'élever les môles qu'à mi-marée sont les principales causes de leur résistance.

Construction américaine. — Les fascinages sont très usités en Amérique et diffèrent un peu dans leur construction de ceux de Hollande; ils ne sont d'ailleurs pas faits partout de la même façon; en voici un modèle très courant : On construit d'abord un grillage en gaules espacées de 2 mètres, placées les unes (gaules inférieures) parallèlement, les autres (gaules supérieures) perpendiculairement à la longueur du matelas. Sur ce grillage est étalé un lit de fascines jointives, recouvert d'une couche à angle droit avec les premières et espacées de 2 mètres; les deux rangées sont comprimées par un deuxième grillage de gaules, qu'une corde très serrée réunit au premier.

Ces matelas se construisent à terre sur une voie de charpente inclinée de 1/12 vers la mer; la voie est graissée et la mise à l'eau est ainsi facile. Sur l'axe, on dispose des mâtereaux destinés à repérer la position qui est rectifiée au moyen d'amarres fixées à des ancres; l'immersion a lieu sous des pierres après repérage parfait, car il est impossible de relever les matelas.

Le prix des matelas est d'environ 5 francs par mètre carré; ils ont l'avantage de se mouler parfaitement sur le fond et d'empêcher l'enfoncement des enrochements, ce qui procure une grande économie. Ainsi aux anciennes digues de la Delaware, il fallait 2 tonnes de pierres pour faire un mètre cube d'enrochements en place, à cause des pertes par enfoncement; dans la fermeture de la passe, comme on a placé à la base un matelas de fascinages, il a suffi d'une tonne et demie pour faire le même volume; l'économie de pierres a donc été de 25 %.

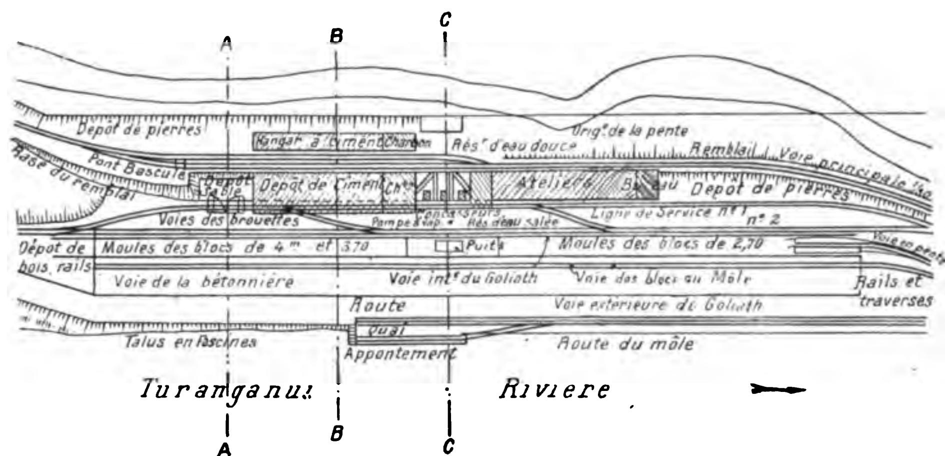
Les fascinages de fondation se recouvrent vite de sable et de boue, ce qui les met à l'abri des tarets; ils durent très longtemps.

CHANTIER DE CONSTRUCTION DES BLOCS

L'installation d'un pareil chantier dépend beaucoup du terrain. Quand l'espace n'est pas mesuré, les blocs sont mis à sécher en lignes, isolés; néanmoins, les diverses parties de la fabrication doivent être installées comportant le minimum de manutention. Nous donnons ici l'installation de Gisborne, Nouvelle-Zélande; le terrain disponible, resserré entre une colline et une rivière, était très restreint et les blocs étaient empilés en trois assises; on était donc astreint à des sujétions qui peuvent être évitées le plus souvent (fig. 283).

On profita des derniers contreforts de la colline pour établir les divers

étages de l'installation ; dans une plaine, il faudrait élever les matériaux ou par des plans inclinés, ou par des grues.



Plan de l'installation de Gisborne.

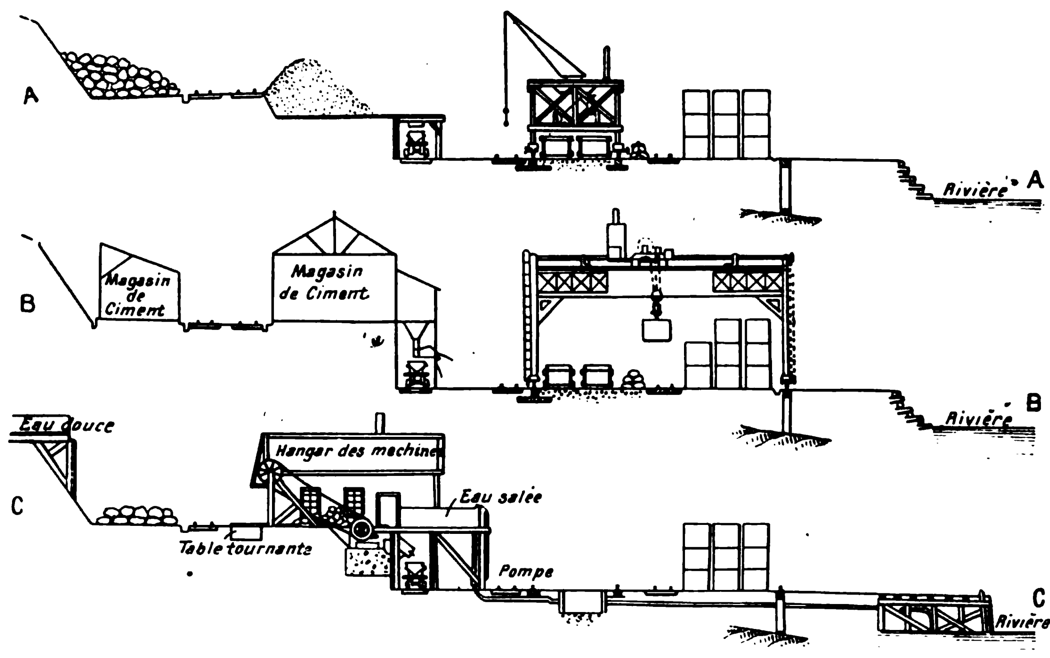
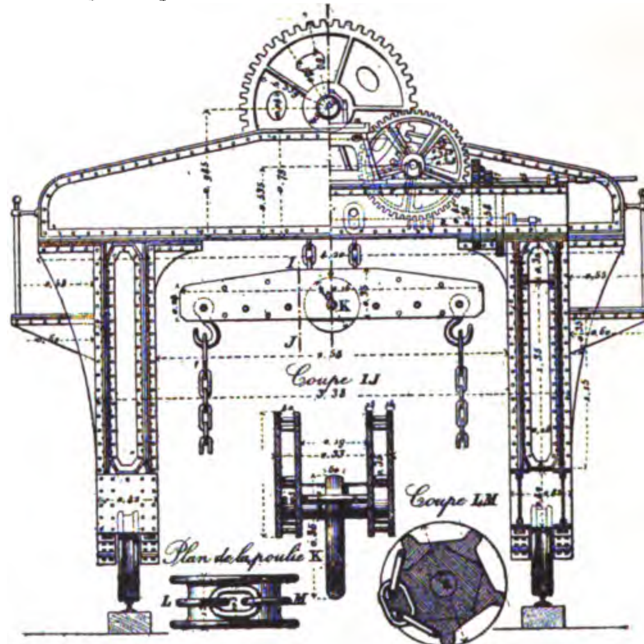


Fig. 283. — Coupes.

Dans la coupe AA, on voit successivement de gauche à droite les dépôts de pierres de réserve et de sable ; celui-ci est sur une plateforme dont

le niveau est à 3 mètres au-dessus de la voie ferrée n° 1, où circulent les wagonnets qui le portent aux bétonnières.



Chariot lève blocs de Boulogne. — Élévation.

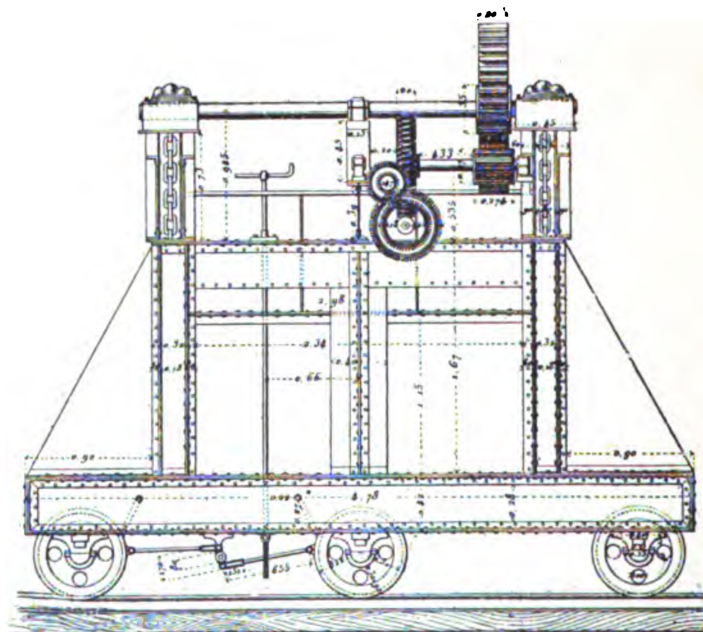


Fig. 284. — Chariot lève blocs de Boulogne. — Coupe.

Coupe BB. Elle montre des magasins de ciment, situés à 4,25 *m* au-dessus de la plateforme des blocs; le ciment se déverse dans un wagonnet qui se rend directement aux bétonnières : un Goliath sert à retirer les blocs des moules quelques jours après leur fabrication, à les empiler, à les placer enfin sur les wagonnets qui, roulant sur la voie ferrée du milieu, les conduisent au môle.

Coupe CC. Elle montre un tas de pierres et les machines à concasser qui jettent les cailloux dans les wagonnets. La plateforme des concasseurs est au même niveau que celle des magasins de ciment.

Le plan indique les diverses lignes ferrées qui en définitive, convergent vers le môle.

Les Goliaths ou bardeurs qui servent au chargement des blocs sur les trucs sont simplement une grue mobile sur voie ferrée. La figure 286 montre celui employé à Boulogne.

CHAPITRE XX

FLEUVES. — ESTUAIRES

Certains fleuves sont accessibles à la navigation, du moins à la marée haute, comme la Tamise, l'Humber, la Gironde ; la plupart, au contraire, n'offrent pas aux navires modernes la profondeur nécessaire et pourtant des ports, même considérables, se sont établis jadis sur leurs rives. Le plus souvent il est nécessaire d'approfondir d'une part l'entrée, d'autre part le lit du fleuve en amont de l'embouchure, deux opérations fort différentes et dont les procédés doivent être étudiés séparément. Nous commencerons par l'étude des moyens d'amélioration de la partie maritime.

PARTIE MARITIME D'UN FLEUVE A MARÉE

L'amélioration de la partie maritime d'un fleuve peut s'obtenir par plusieurs procédés :

1° Par l'arrêt des matériaux d'apports, quand ils ne proviennent pas du cours d'eau lui-même ;

2° Par la rectification du lit et la suppression des causes de dépôt ;

3° Par l'augmentation du volume d'eau poussée par la marée ou de sa vitesse à la sortie.

4° Par le dragage.

Le plus souvent ces divers moyens sont combinés.

RIVIÈRES A COURANT UNIQUE

Dans les rivières sans marée à fond solide, le problème de l'amélioration est très simple. Le lit est rectifié à volonté, aucun apport ne vient déranger l'équilibre établi.

Les difficultés ne se manifestent que dans les cours d'eau à fond mobile.

La ligne de plus grande profondeur de ces rivières, ou thalweg, est loin de se confondre avec l'axe ; dans les alignements, elle divague de côté et d'autre sans qu'il soit possible d'assigner de règle à ces changements ; dans les courbes, d'une façon générale, les profondeurs ou *mouilles* se portent sur les parties concaves, tandis que les convexités sont le siège de dépôts. Les mouilles de deux courbes voisines sont séparées par des bas-fonds ou *maigres*.

Relations entre la forme et le profil. — Dans certaines conditions, il existe des relations entre la forme en plan d'une rivière et le profil du thalweg. L'action des courbes sur la profondeur ne peut évidemment être due qu'à une convergence des filets liquides ou à un changement de vitesse : la force centrifuge développée par la courbe dirige le courant vers la concavité ; l'eau s'y accumule, relève son niveau et déverse les matières qu'elle contient sur la rive convexe ; mais ce n'est sans doute pas là la seule explication des résultats constatés. Pendant les crues, la courbe agit comme un obstacle ; il en résulte à l'amont un relèvement du niveau et à l'aval par conséquent un accroissement de vitesse qui détermine le creusement (M. Lokhtine).

Il se produit encore une action sur laquelle l'attention n'a pas été attirée jusqu'ici. La vitesse à la surface est toujours plus grande que dans le reste de la hauteur du liquide. La couche superficielle est donc celle qui éprouve la plus forte résistance contre l'obstacle élevé par la courbe. Pour le franchir, cette couche s'incline. Les filets prennent une direction verticale et acquièrent ainsi une puissance d'affouillement. Le mouvement vertical se combinant avec la vitesse horizontale du courant produit une résultante oblique qui ne va creuser le fond qu'à une certaine distance en aval.

La convergence des filets liquides dans les deux sens, horizontal et vertical, ainsi que la hauteur du remous sont évidemment fonction de la forme de la rivière. La convergence s'accroît avec la courbure, ainsi par conséquent que l'obstacle opposé à l'écoulement.

Influence de la largeur. — L'influence de la largeur du cours d'eau est primordiale. Pour se porter sur les concavités successives, le courant doit se réfléchir de rive en rive, que les sinuosités se succèdent sur le même bord ou sur les bords opposés. Dans une rivière trop large, ces réflexions ne s'effectuent pas.

Si l'espace qui sépare deux courbes est trop long ou trop court par rapport à la largeur, la direction des filets change. Il y a donc entre la longueur des courbes et la largeur de la rivière un rapport nécessairement plus favorable que les autres.

Sur la Garonne, M. Fargue a trouvé qu'à une largeur de 180 mètres correspondait comme longueur la plus favorable celle de 1 330 mètres entre les sommets des courbes. Dans ces conditions, le savant ingénieur a constaté les faits suivants :

Observations de M. Fargue. — Le maigre correspond au point d'inflexion de la courbe, avec un écart à l'aval égal au double environ de la largeur. Le point d'inflexion est celui qui sépare les deux courbures successives, quel que soit leur sens.

La mouille se trouve avec le même écart en aval du sommet.

La régularité du thalweg dépend de celle de la courbure.

A tout changement brusque de courbure correspond une diminution de profondeur.

Il faut, dans la régularisation d'un cours d'eau, éviter les alignements ainsi que les arcs de cercle et exécuter les raccordements par une courbe dont la courbure est proportionnelle à celle de l'arc, courbe qui varie suivant le profil du thalweg.

Il importe que la largeur soit plus grande au sommet des courbes qu'aux points d'inflexion voisins. Les rives convexes doivent être plus développées que les concaves.

L'application de ces règles demande, on le voit, une étude complète des conditions caractéristiques de la rivière.

Exceptions. — Cependant, dans certaines conditions, il est utile de redresser un cours d'eau.

La Moy, sur la côte occidentale d'Irlande, a été améliorée en remplaçant un lit tortueux par une coupure en ligne droite endiguée entre des levées ; la profondeur est aujourd'hui quatre fois plus grande qu'auparavant.

Dans les fleuves à grand trafic, où les frais de dragage ne constitueraient qu'une dépense minime en comparaison des résultats obtenus, les dépôts — s'il s'en produisait dans une coupure droite bien proportionnée, ce qui n'est pas toujours certain — pourraient être enlevés par la machine, et l'avantage d'une route droite ne serait pas discutable.

L'entretien des profondeurs de ces fleuves est également dû au courant. Mais il n'a pas toujours la même direction, sauf sur certains cours d'eau (Saint-Laurent, Maule) et il se renverse durant le flot.

Le courant ascendant ne peut avoir qu'une influence néfaste, car il remonte les alluvions empruntées au lit d'aval de la rivière ou provenant de la mer. Heureusement, le courant de jusant a une action prédominante, pour deux raisons : la première est que le volume qui s'écoule alors est grossi des eaux propres de la rivière ; la seconde tient à l'état dans lequel les deux phases de la marée rencontrent le lit. Durant le flot, l'aire de chaque section et son rayon hydraulique vont continuellement en augmentant ; la vitesse, pour une montée égale de l'onde, est donc plus grande en haute mer qu'en basse mer. Le phénomène contraire se passe pour le jusant, dont la force d'affouillement est ainsi concentrée vers le fond.

Au commencement du flot le courant, on l'a vu, se porte sur la rive convexe ; de même au début du jusant. Puis il s'établit le long de la rive concave où s'effectue le creusement. L'action combinée du changement de sens et de l'écart fait que les mouilles se forment à l'aval du sommet pendant le jusant et à l'amont durant le flot.

Pour réunir les deux parties profondes ainsi creusées, il faut élargir le lit au sommet.

Fleuves très larges. — Sur un fleuve très large, les choses ne se passent pas de la même façon. Les filets réfléchis par une rive n'atteignent pas l'autre ; l'influence des courbes est donc annulée et le courant divague comme dans les alignements. Si le lit est profond, les vitesses suffisantes, les profondeurs se maintiennent. Si au contraire le lit est encombré, c'est que ses dimensions ne sont pas en rapport avec le volume d'eau débité et il y a lieu de le régulariser.

Mais les conditions de la régularisation ne sont pas connues comme pour les rivières à courant continu. Dans les estuaires de ce genre, les mouilles ou *rades* ne se rencontrent pas en des points déterminés ; elles se trouvent aussi bien devant les pointes qu'aux courbes.

L'affouillement devant les pointes s'explique comme sur les rivages de la mer. Les courants qui longent une concavité sont déviés par la pointe, mais dans les grandes rivières encombrées leur largeur

est limitée ; parfois le fleuve se partage au-dessous de la surface en bras secondaires séparés par des bancs allongés sur lesquels la vitesse est presque nulle. La pointe en saillie venant à rétrécir ces courants de largeur limitée détermine un affouillement à son pied.

Fleuves de largeur ordinaire. — Quand les dimensions du fleuve ne sont pas trop grandes, les rades alternent parfois sur les deux rives (fig. 285) ; le volume d'eau qui y circule est plus considérable que dans le reste du lit, et l'excédent passe de l'une à l'autre en *d i*. Il se détermine là un *appel des eaux* et M. Pasqueau a fait remarquer que

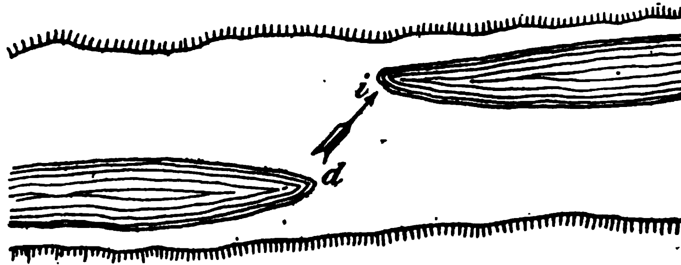


Fig. 285. — Appel des eaux.

le dragage et l'établissement d'ouvrages de direction appropriés peuvent déterminer dans ce sens un régime durable.

La correction le plus généralement apportée aux cours d'eau consiste dans leur rétrécissement par des levées longitudinales, car il semble naturel de proportionner les largeurs aux volumes débités, de façon à provoquer l'approfondissement. Dans les rivières à courant constant et à fond mobile, la section du lit correspondant à une profondeur donnée se détermine facilement. D'un affluent à l'autre cette section reste constante, sauf les élargissements aux sommets des courbes, comme il a été indiqué.

Dans les rivières à courant renversé, les rétrécissements rationnels ont également pour résultat l'affouillement du fond ; mais, mal conçus, ils exercent une influence néfaste. Le volume à écouler à l'ebbe comprend le débit propre du fleuve et le cube d'eau de marée introduit ; si la section est trop réduite, elle crée un obstacle à l'introduction du flot et le volume de l'onde qui remonte le fleuve est réduit.

Il existe des lacs communiquant avec des mers à marées par des canaux encombrés de bancs et où ne se constate aucune oscillation du niveau ; au contraire, l'amélioration des estuaires et des lits des fleuves

a pour résultat la pénétration de la marée à une distance plus grande qu'auparavant, et par conséquent l'augmentation de la chasse au jusant.

Le principe de toute régularisation du lit d'une rivière qui communique avec une mer à marée est donc l'introduction du volume maximum d'eau de marée.

Forme en plan. — Convient-il de composer en plan la portion maritime d'un fleuve de courbes successives ou d'alignements ? C'est une question qui ne comporte pas de solution unique. Les rivières ont un cours établi difficile à modifier. S'il existe des courbes, il faut les traiter comme il a été dit plus haut, en les élargissant au sommet; l'expérience entre pour une bonne part dans l'établissement du projet, car on n'a pas pour guides les résultats certains obtenus sur les cours d'eau étroits à courant unique.

Néanmoins, si le tracé peut être changé — ce qui se rencontre lorsqu'il s'agit de raccourcir par des coupures les méandres d'une rivière ou de donner à un cours d'eau un nouveau lit (Meuse au Hoek von Holland) — il y aura souvent avantage à rendre ce lit plutôt courbe, fût-ce avec un grand rayon. Dans un chenal sinueux dont les dimensions ne sont pas exagérées, l'influence du premier flot ou du premier jusant n'est pas suffisante pour contre-balancer celle de la force centrifuge et l'on saura à l'avance où s'effectueront les dépôts.

Méthodes d'amélioration. — Malgré tout, il y aura aussi parfois des alignements. Dans ce cas et également dans les courbes des vastes fleuves, la meilleure solution sera de créer un lit mineur au milieu du lit majeur qui n'est autre que celui même du cours d'eau. La section en sera calculée pour contenir le débit en haute mer de morte eau et à l'étiage. C'est ce qui a été fait avec succès sur le Weser, au moyen de levées en fascines. Dans le chenal le courant ne peut divaguer et il ne s'effectue pas de dépôts.

Les courbures seront ménagées de façon à ne présenter aucun changement brusque ; il en résultera que les distances entre les levées et la rive voisine ne seront pas toujours égales et que les deux lits ne seront pas symétriques.

Durant le flot, le courant montera d'abord et surtout dans le lit mineur, dont le rayon hydraulique est supérieur à celui de l'autre. Il y aura donc là tendance à un exhaussement de la surface et par suite

déversement sur les côtés de l'excédent de liquide. Les alluvions entraînées par le flot et qui tombent ainsi latéralement s'y déposent.

Au jusant, tout se passe en sens contraire ; la vitesse, maxima dans le chenal, y détermine une dépression, et l'eau du lit majeur s'y déverse, mais elle n'a pas assez de puissance pour ramener les dépôts alluvionnaires qui peu à peu colmatent l'espace compris entre les levées et les rives. Ce colmatage ne pourra être complet, car les eaux des crues et des hautes mers de vive eau ont à se loger dans les canaux latéraux et il s'établira un équilibre entre leur vitesse et la profondeur.

Les levées du lit mineur doivent donc être submersibles ; il s'en suit qu'à une certaine hauteur de marée elles disparaissent et le fleuve semble couler en un lit unique ; mais les molécules qui passent dans les limites du chenal profond sont animées d'une marche supérieure. Elles éprouvent contre les autres un frottement retardateur nuisible, en rapport avec la différence des vitesses.

Il importe en conséquence que le lit majeur oppose le minimum de résistance au mouvement des filets liquides.

De là suit la nécessité de ménager également au lit majeur les formes les plus régulières, d'enlever les obstacles, les coudes, les bancs, etc. Les îles sont à supprimer, s'il est possible, car la vitesse dans les deux bras est évidemment inférieure à celle d'un bras unique. La jonction avec les affluents doit être régularisée pour éviter les chocs et les remous.

Ce n'est qu'après cette régularisation du cours ancien du fleuve que sera tracé le lit mineur. Il aura une largeur telle que le volume des eaux ne pourra y passer sans creuser le fond.

Quand les résultats commenceront à se produire, la propagation de la marée en amont sera plus facile. Le lieu géométrique des hautes eaux, qui se rapproche d'un plan horizontal tangent à la crête de la pleine mer à l'embouchure, ce lieu géométrique n'aura guère changé, mais il n'en sera pas de même de celui des basses eaux. La facilité d'écoulement le fera baisser, et le prisme de marée, qui se loge entre ces deux lignes, sera augmenté.

Ces divers phénomènes réagissent les uns sur les autres et déterminent en définitive l'accroissement de profondeur dans le lit mineur.

L'accroissement est-il d'avance calculable ?

Evidemment pas d'une façon mathématique, mais on peut s'en rendre

compte approximativement, d'après les profondeurs d'aval; il est possible, suivant les conditions de l'embouchure, du lit, des matériaux, de la marée, etc., de déterminer le lit mineur de façon à obtenir un affouillement uniforme, dans certaines limites, bien entendu.

Le but à réaliser est donc d'augmenter le volume de l'eau de marée qui entre dans le fleuve, afin d'obtenir une chasse considérable au jusant. Le moyen le plus pratique c'est de faciliter la propagation de l'onde marée aussi loin que possible en amont.

Réservoirs latéraux. — Dans certains fleuves existent des réservoirs latéraux constitués par des marais, polders, etc. Doivent-ils être conservés ? C'est, comme toujours, une question d'espèce.

Le volume nécessaire au remplissage de ces réservoirs ne doit pas diminuer celui qui remonte le lit du fleuve ; il faut donc que l'embouchure et la partie du lit en aval du réservoir permettent le passage d'un cube suffisant pour alimenter l'ensemble. Si cette condition est remplie il sera préférable de conserver les réservoirs, qui ajouteront au jusant un volume notable ; autrement, et c'est là le fait ordinaire, la suppression est indiquée. La jonction du canal de déversement du bassin avec le lit sera, en cas de conservation, dessinée pour ne pas occasionner de remous et de courants transversaux, car il en résulterait des dépôts.

Quant aux bras secondaires ils seront barrés, on a vu pourquoi. Le barrage peut être exécuté en amont ou en aval de l'île ; dans le premier cas, le bras supprimé est conservé comme un réservoir latéral, et seulement au cas où celui-ci n'offre pas d'inconvénient ; dans l'autre, le lit supprimé se comble peu à peu, et peut même être utilisé pour le dépôt des déblais. Au Weser, le barrage a été exécuté vers la partie médiane ; les lits d'amont et d'aval servant l'un de lieu de dépôt, l'autre de réservoir.

S'il existe plusieurs bras, on conservera celui qui semble pouvoir être le mieux amélioré ; l'expérience de l'ingénieur est décisive dans toutes ces questions délicates.

Au Congrès de Paris en 1892, la proposition suivante, laissée très vague à dessein, a été votée :

« Il convient en général de demander la capacité de remplissage nécessaire au bon fonctionnement des fleuves à marée au lit même de ces fleuves, par un aménagement rationnel et méthodique de leurs largeurs et de leurs sections, et non à des réservoirs latéraux qui ont souvent de

graves inconvénients et ne sont à créer que dans des cas spéciaux. »

Les considérations ci-dessus exposées serviront de guide dans les cas étudiés.

CUBATURE DES VOLUMES DE MARÉE

Pour proportionner le lit d'un fleuve au volume à débiter, soit vers l'amont, soit vers l'aval, selon la phase de la marée, il est nécessaire de déterminer ce volume à un moment donné dans une section considérée.

Suivant l'exactitude désirée divers procédés sont applicables.

Mesurage dans une seule section. — On choisit une section aussi régulière que possible ; elle est partagée en tranches verticales de surface s, s', s'' limitées aux principaux accidents du lit. Chacune possède une vitesse moyenne v, v', v'' qui est déterminée. Le débit est égal à $\Sigma\, vs$. L'opération répétée à plusieurs reprises pendant le flot ou le jusant, en admettant la variation régulière de la vitesse et de l'aire entre les observations, donne le volume total monté ou écoulé.

Cette méthode exige autant d'observateurs que de tranches, car les mesures doivent être simultanées. Il n'en est pas de même dans le procédé suivant :

Pour chaque tranche, pendant toute la durée de la marée, on construit trois courbes ayant chacune pour abscisses les temps et pour ordonnées : la première les vitesses moyennes v observées ; la seconde les surfaces s ; la troisième le produit vs des ordonnées des deux premières.

Les surfaces sont déterminées à l'avance, ainsi qu'il sera indiqué plus loin, pour chaque hauteur. Les mesures ne portent donc que sur la hauteur et la vitesse moyenne correspondante ; et puisqu'il s'agit de construire des courbes, les observations peuvent être successives dans chaque tranche, où le même observateur pourra se transporter à intervalles assez rapprochés.

La surface de la troisième courbe donne le volume V qui a passé dans la tranche considérée ; la somme pour toutes les tranches indique le volume total écoulé.

Ces deux procédés sont expéditifs, mais d'une exactitude médiocre. La mesure des vitesses moyennes est difficile, vu les directions inverses au commencement du flot et du jusant à la surface et dans les courbes.

Cubature par profils instantanés. — On mesure à deux instants différents le volume d'eau existant en amont de la section consi-

dérée. La différence de ces volumes indique le cube de remplissage ou de vidange dû à la marée, augmenté du débit propre du fleuve pendant le temps considéré.

Le volume total qui passe dans une section donnée se jauge en partageant en un certain nombre de parties la longueur du fleuve comprise entre cette section et la limite supérieure de la portion maritime, au jour de l'observation. Le calcul se simplifie, si ces longueurs sont égales, mais il est indispensable de faire coïncider les divisions avec les variations les plus notables du lit, pour mieux représenter toutes les conditions ; entre deux divisions, les rives sont considérées comme rectilignes.

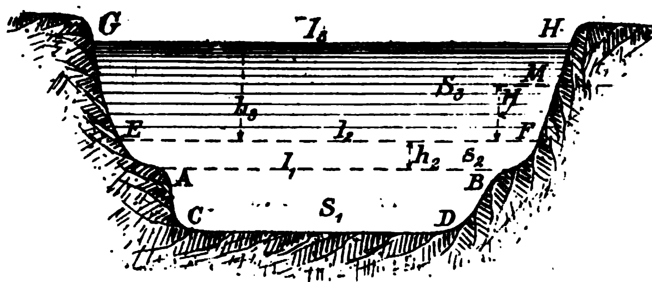


Fig. 286. — Cubature du volume de marée.

L'aire de la section droite est mesurée en chacun des points de division.

Soit (fig. 286) l'une d'elles.

AB, niveau de basse mer,

GH, niveau de haute mer.

La surface ABHG se mesure en la partageant par des horizontales, afin de tenir compte des inflexions des talus ; dans la figure il en a suffi d'une pour que les côtés puissent être considérés comme rectilignes.

La surface ABDC ou S_1 est constante, son niveau ne variant pas.

D'autre part, on a :

$$S_2 = \frac{l_1 + l_2}{2} h_2$$

$$S_3 = \frac{l_2 + l_3}{2} h_3$$

Les surfaces S_2 et S_3 étant exprimées par des équations linéaires peuvent donc être représentées par deux droites tracées à l'avance. Des règles graduées donneront le niveau en un moment quelconque, et la surface de la section sera aisément trouvée en ajoutant à S_1 les portions

de S_2 et S_3 déterminées par les constructions indiquées. Si le niveau est en M, par exemple, à la hauteur H au-dessus de EF, la surface sera

$$S_1 + S_2 + y_H$$

y_H étant l'ordonnée pour l'abscisse H de la droite S_3.

Le volume écoulé entre deux instants donnés à la section sera la somme des troncs de pyramide FGML, EFLK..... et de la pyramide ABH, dont on possède tous les éléments (fig. 287).

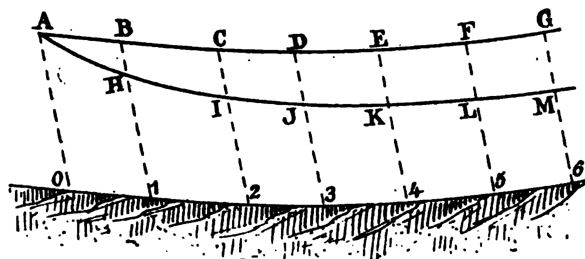


Fig. 287. — Cubature du volume de marée.

Il y faut ajouter le débit propre du fleuve, calculé en amont du point A limite de la partie maritime, par les procédés ordinaires de jaugeage.

Il sera tenu compte, au besoin, des bras ou des affluents atteints par la marée.

Si les courbes AG, AM, représentent les niveaux de haute et basse mer, le volume obtenu est le volume total passé dans la section 6 pendant la marée.

Un lecteur est obligatoire, pour prendre le niveau aux heures convenues dans chaque section ; mais en cas de nécessité, ces niveaux pourraient être obtenus par des moyens mécaniques faciles à concevoir.

Largeur du lit. — L'onde-marée diminue d'amplitude à mesure qu'elle remonte un fleuve. Le volume qui passe en un temps donné est donc plus grand dans une section d'aval que dans une d'amont. Pour que la vitesse reste constante, ce qui est une condition de bon entretien, les largeurs du lit doivent aller en augmentant vers l'embouchure.

Les cubatures pratiquées comme il a été indiqué ci-dessus ne donnent pas la valeur relative théorique des volumes que doit laisser passer chaque section : le fleuve idéal n'existe pas. Des obstacles de toute nature, courbes, variations de largeur, saillies, bras, bancs, etc., gênent

la propagation de l'onde. Les estuaires sont le plus souvent disproportionnés avec l'importance du fleuve et de la marée.

Formule Mengin-Lecreulx. — Mais à la limite supérieure de la partie maritime il n'existe aucun doute sur le volume qui passe, c'est le débit propre du fleuve. On peut donc y déterminer la largeur du lit en fonction de la vitesse du courant et de la profondeur. Cette quantité étant connue, il est possible d'en déduire les accroissements à l'aval par la formule approximative suivante, donnée par M. Mengin-Lecreulx, d'après une analyse aussi complète que possible des conditions multiples d'un tel problème :

$$\frac{\Delta L}{L} + \frac{\Delta H}{H} + \frac{\Delta V}{V} = \frac{0{,}04}{V} \frac{0{,}8\,(1 + m)\,\frac{Z}{H}}{(0{,}08 + 0{,}4\,m')\,\frac{Z}{H} + 1.}$$

dans laquelle :

L représente la largeur du lit au niveau de basse mer,

V la vitesse moyenne du jusant,

H la profondeur du chenal à mi-durée de jusant,

$\frac{\Delta L}{L}$, $\frac{\Delta H}{H}$, $\frac{\Delta V}{V}$ expriment les accroissements kilométriques de ces quantités ou modules d'accroissement kilométrique; on peut alors les écrire aussi μ_L, μ_H, μ_V.

Z, l'amplitude de la marée en chaque point,

$(1 + m)$ L est la largeur moyenne du lit au-dessus de basse mer, $(1 + m)$ étant ce qu'on peut appeler le coefficient d'élargissement du lit majeur,

m' est une quantité exprimant l'influence de l'élargissement m sur la vitesse moyenne ; approximativement, $m' = \frac{1}{2}\,m$.

On peut, en calculant le module d'accroissement kilométrique pour une longueur assez faible, prendre pour V et H la valeur moyenne de ces quantités dans une section ; alors ΔV et ΔH deviennent nuls.

Enfin, V doit se rapprocher, d'après l'expérience, de la valeur 80 *cm* pour que le régime du fleuve soit le meilleur possible ; on peut donc faire entrer cette valeur dans la formule qui devient alors

$$\mu_L = \frac{0{,}4\,(1 + m)\,\frac{Z}{H}}{(0{,}08 + 0{,}02\,m)\,\frac{Z}{H} + 1}$$

Pour une longueur de n kilomètres, on pose

$$L_n = L_o (1 + \mu_L)^n$$

L'application de la formule à l'embouchure de la Seine, où

$$Z = 6 \qquad H = 6 \qquad \frac{Z}{H} = 1$$

donne

$$\mu_L = \frac{0,04\,(1 + m)}{1,08 + 0,02\,m}$$

En faisant varier m de 0 à 0,50 la formule donne les valeurs de μ_L et par suite de L_n. Ainsi, la largeur du lit étant de 300 mètres à Rouen, l'expression indique pour Caudebec et la Risle les largeurs respectives 400 et 1 500 mètres, bien supérieures à celles qui existent, car celle en la dernière localité n'est que 500 mètres. Elle indique enfin 2 000 mètres à l'embouchure, « largeur avec laquelle, dit l'auteur, les difficultés disparaîtraient ».

L'établissement de cette formule nécessite plusieurs hypothèses ; elle n'est donc pas rigoureuse, mais n'en constitue pas moins une sérieuse base d'étude.

Formule Wheeler. — M. Wheeler a donné pour la même détermination la formule suivante [1] :

M étant la largeur moyenne à basse mer près de l'embouchure,

M' cette largeur à une distance de N milles en amont,

x la largeur en un point intermédiaire, à N' milles en aval de M', les trois quantités en pieds,

On a :

$$x = M' (1 + C)^{N'}$$

C étant donné par

$$C = \sqrt[N]{\frac{M}{M'}} - 1$$

Cette formule est évidemment due à l'observation de l'Humber, qu'un ingénieur anglais a appelé « le modèle des fleuves ». Elle ne peut être générale, car la première condition dont il faille tenir compte est évidemment l'amplitude de la marée, qui n'y figure pas. A la Seine, en admettant avec M. Mengin-Lecreulx qu'au méridien de Honfleur il fau-

(1) Nous rétablissons ces formules telles qu'elles doivent être écrites. Il y a des erreurs de typographie dans l'excellent livre de M. Wheeler : *Tidal Rivers*. Nous devons la rectification à l'obligeance de l'auteur.

drait une largeur de 2000 mètres, la formule de M. Wheeler donne 600 mètres à Caudebec et 1 350 mètres environ à la Risle. On voit que le dernier résultat concorde d'une façon satisfaisante avec celui obtenu par la formule plus scientifique de M. Mengin-Lecreulx, mais il n'en est pas de même pour Caudebec.

Le coefficient d'augmentation pour les premières sections d'amont est beaucoup plus fort; il est un peu plus faible pour celles d'aval. Mais la comparaison des résultats des deux formules semble devoir donner des indications utiles pour un avant-projet de correction d'une rivière à peu près dans les conditions de l'Humber, comme la Seine.

Souvent, la largeur à l'embouchure est invariable, comme lorsque les deux rives sont occupées par des villes, ou quand l'élargissement serait trop coûteux, alors ce sont les largeurs intermédiaires qu'on doit tirer des formules.

Délais. — L'amélioration sans dragages du lit d'un fleuve n'est due qu'à la différence de puissance du jusant et du flot, et elle demande plusieurs années pour se produire. Le transport des sables sur le fond est, en effet, très lent. Des expériences de Dubuat tendent à prouver que le sable ne se déplace que de six mètres par jour sous l'influence d'un courant continu de 30 centimètres. D'après la Commission du Mississipi, à une profondeur de 15 mètres le mouvement journalier n'est que de 4 à 6 mètres pour une vitesse d'un mètre et de 10,50 *m* pour 1,75 *m*.

Dans un chenal à marée, l'écoulement du sable est encore moins rapide, à cause des changements de direction de la vitesse. Les détritus jetés par les égouts dans la Tamise ne descendent guère que de huit kilomètres en une quinzaine (1).

A la passe corrigée du Mississipi, malgré une vitesse de 1 à 2 mètres par seconde, l'approfondissement ne s'est produit qu'après un long temps. Il a été de 45 millimètres par an à la Liffey, où le courant atteint 2 mètres.

(1) Ce fait et d'autres analogues ont amené Barret à penser que le mouvement de la marée s'opérait superficiellement au-dessus du niveau de basses eaux. Cette conception est en contradiction avec la nature de l'onde-marée, qui est censée se propager sur toute la profondeur. D'autre part, l'eau salée étant plus lourde que l'eau douce devrait, au contraire, se précipiter vers le fond. Quoiqu'il en soit, la pollution de la Tamise et d'autres rivières dans le même cas s'explique assez difficilement.

FLEUVES AMÉLIORÉS

Quelques exemples de fleuves dont la capacité navigable a été améliorée dans leur partie maritime donneront l'idée des diverses méthodes employées.

La Seine. — La navigation entre Rouen et le Havre présentait jadis de grandes difficultés. Le lit du fleuve était encombré de bancs de sable mobiles sans cesse remués par les violents courants de la marée ; en quelques jours le chenal se transportait d'une rive à l'autre. La profondeur était variable et insuffisante ; en aval de Quillebeuf il n'y avait que 1,76 à 4,30 *m* aux pleines mers de morte et vive eau ; en amont existaient de nombreux bancs dangereux.

Sur l'avis de Frimont et Deschamps, Bouniceau dressa un projet qui, exécuté de 1848 à 1867, a coûté 55 millions, tant pour les frais de premier établissement que pour les réfections.

L'amélioration a été réalisée par la construction de levées longitudinales s'étendant tantôt sur les deux rives, tantôt sur une seule, entre la Meilleraye et la Risle, et formant 43 kilomètres de longueur. L'écartement allait en croissant de 300 à 500 mètres de l'un à l'autre de ces points. Les levées sont construites en blocs de craie extraits des falaises des rives et transportés par bateau. Jusqu'à Tancarville, rive droite, et la Roque, rive gauche, les levées sont hautes, c'est-à-dire dépassent le niveau des plus grandes marées ; en aval elles sont submersibles, d'une part pour raison d'économie, d'autre part pour troubler le moins possible le régime des marées et du mascaret et empêcher le dépôt des alluvions.

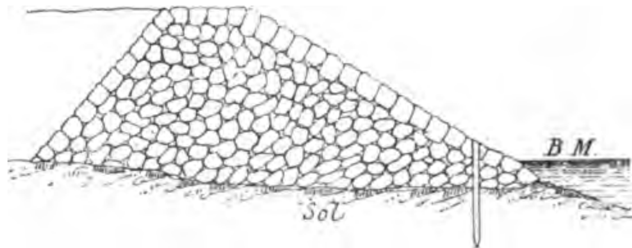


Fig. 288. — Anciennes levées de la Seine.

La figure 288 donne le profil des anciennes levées. Les matériaux étant légers et gélifs se sont rapidement avariés ; on a procédé au tra-

vail de réfection indiqué par la figure 289. Les numéros désignent : 1, l'ancienne jetée basse ; 2, son élargissement ; 3, les alluvions déposées après l'élargissement ; 4, une charpente de soutien ; 5, le rechargement de blocs derrière la charpente ; 6, l'arrimage des talus. Le massif a reçu comme protection une couche de béton de 25 *cm* d'épaisseur ; le pied a de même été appuyé par une risberme de béton.

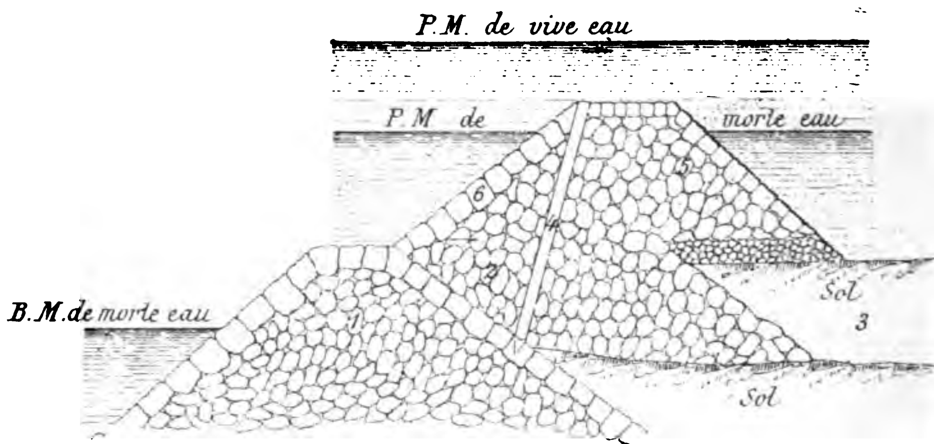


Fig. 289. — Nouvelles levées de la Seine.

Les résultats de l'endiguement sont des plus remarquables. Le lit s'est creusé de 7 mètres à la traversée de Villequier,
4 — — d'Aizier,
9 — en aval de Quillebeuf,
5 — à la Roque.

Le volume des déblais qui a été emporté par le courant, aidé par quelques rares dragages des seuils rocheux, est de 60 millions de mètres cubes. Le port de Rouen reçoit des navires calant 6,50 *m*, et son tonnage qui n'était que de 500 000 tonnes en 1860 a atteint 2 270 000 tonnes en 1898.

Les espaces situés entre les levées et les rives se sont rapidement colmatés et ont donné naissance à 9 000 hectares de prairie, qui sont revenus aux propriétaires riverains. Leur valeur est estimée à 30 millions.

Il est hors de doute que si les travaux de la Seine étaient à refaire aujourd'hui, le tracé des levées serait modifié et donnerait des résultats encore plus avantageux.

Le Weser (pl. XIII, fig. 3). — Le Weser a été amélioré par M. Franzius, qui a créé un lit mineur à levées submersibles au milieu du fleuve.

Voici le programme des études préliminaires qui a été suivi :

Elles s'opèrent sur une carte du fleuve à grande échelle, $\frac{1}{5\,000}$, où des courbes de niveau figurent les profondeurs.

Les courbes de marée sont relevées en de nombreux points et servent à dresser le profil instantané d'heure en heure. Elles sont dessinées au dessous les unes des autres, en ordre et en tenant compte des temps, chaque ligne verticale représentant la même heure. Les courbes donnent donc le niveau de l'eau au même instant aux différentes stations.

Le profil instantané et les sections correspondantes permettent le calcul des débits aux diverses périodes et de la vitesse en chacun des points d'observation à chaque heure de la marée.

Ces données, représentées graphiquement, indiquent les conditions du fleuve avant la correction.

La détermination de ce qu'elles seront après se fait par tâtonnement au moyen de données provisoires. La profondeur à atteindre a été d'abord fixée à 5 mètres. Dès lors, on peut chercher ce que deviendraient après les travaux les courbes de marée, les débits, etc., et par suite les largeurs?

Le nouveau lieu des hautes mers variera peu, puisqu'il se confond presque avec le plan horizontal passant par le point maximum de l'amplitude à l'embouchure, mais celui des basses mers s'abaissera. Il sera représenté par une ligne à courbure continue dessinée en tenant compte de la pente dans la partie supérieure du fleuve et par analogie avec les résultats obtenus dans les cours d'eau déjà améliorés; il est prudent de tracer cette ligne plus haut que la profondeur espérée.

Les futures courbes de marée se déduisent des données précédentes et de la vitesse de propagation de l'onde-marée calculée par la formule $v = \sqrt{gh}$, de la façon suivante :

On prend comme point initial une station assez en amont pour que les travaux n'y doivent pas produire de modification essentielle. La courbe de marée y est divisée suivant la hauteur en un certain nombre de parties. Partant de chacune des divisions, les éléments précédents permettent le calcul des points de la nouvelle courbe du flot, à la station suivante, et ainsi de suite.

Parmi les courbes de flot ainsi calculées, la plus analogue aux courbes actuelles sera choisie comme type et les courbes du jusant seront dessinées d'après la sienne.

Si la largeur à donner à chaque station était connue, il serait facile de déterminer dès lors le volume du prisme de marée qui y passerait. Or, volume et largeur étant fonction de la vitesse, celle-ci sera choisie capable d'entraîner les matériaux du fond, et la largeur et le volume en découleront. On répétera les calculs en leur donnant à chaque fois une plus grande approximation, d'après les résultats obtenus dans chaque section et l'on aura en définitive des valeurs en concordance.

La détermination du lit futur sera double : un pour le niveau de basse mer, un pour celui de hautes eaux. Le premier constituera un lit mineur qui est limité par des levées longitudinales dont la crête s'élèvera à peine au-dessus du niveau des basses mers. Quant au lit majeur, il est constitué par celui du fleuve tel qu'il était. Les autres conditions d'amélioration déjà énumérées, barrage des bras latéraux, régularisation des berges, etc., seront remplies.

Tels sont les principes appliqués sur le Weser. Les levées qui délimitent le lit mineur ont été tracées non d'après des règles générales, mais seulement de façon à obtenir l'économie maxima. Ainsi le thalweg ancien a été suivi autant que possible. Les lits majeur et mineur sont donc dissymétriques.

En modelant le lit mineur sur le thalweg il n'y a eu à extraire que 54 millions de mètres cubes tandis qu'il y en aurait eu le double, 106 millions, si l'on eût placé le lit mineur symétriquement par rapport à l'autre.

Remarquons que cette préoccupation exclut toute idée de traitement rationnel de la forme du lit en plan ; il n'a été tenu aucun compte des observations dont nous avons donné le résumé sur l'influence des courbures, des largeurs relatives, etc. Le tracé comprend de longues portions rectilignes ; quant aux courbes, on n'a cherché qu'à les adoucir et à supprimer les obstacles.

La profondeur, qui n'était que de 2,75 *m* avant la correction, a atteint aujourd'hui 5 mètres et de nouveaux travaux doivent la porter à 6 mètres.

Le cube de marée entrant au flot a considérablement augmenté. Par exemple, il a passé à Farge de 230 à 470 mètres cubes par seconde et la vitesse s'est accrue de 33 centimètres à 46. On avait calculé 280 mètres

cubes en plus à Farge et l'on espère les obtenir quand le régime définitif sera établi.

Il est à noter que la limite de l'eau salée n'a guère changé dans le lit.

Il est juste de dire que plus de la moitié des matériaux qui encombraient le fleuve a été enlevée par le dragage (33 millions de mètres cubes). Ce volume extrait directement n'est pas le seul qu'il faille mettre au compte de la machine; sur la moitié entraînée par le courant, une partie n'a pu être mise en mouvement que par suite de l'augmentation de vitesse due au creusement.

Il faut donc attribuer à la drague la majeure partie du succès obtenu; d'ailleurs, c'est à elle qu'on demande actuellement l'excédent de profondeur désiré.

L'entretien sera-t-il facile?

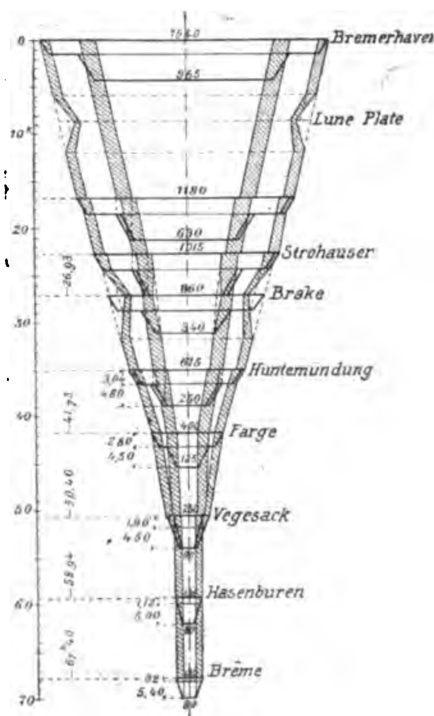


Fig. 290. — Diagramme des sections du Weser.

Le dragage paraît devoir être encore là le principal facteur du succès.

Le diagramme (fig. 290) représente les accroissements de section donnés au Weser.

Le tableau suivant indique comparativement les résultats qu'on aurait

obtenus avec les formules de MM. Mengin-Lecreulx et Wheeler en partant de la première valeur (130 mètres à Brême) dans tous les cas. On fera deux remarques : le terme $(1 + m)$ que M. Mengin-Lecreulx appelle le coefficient d'élargissement du lit majeur est très variable dans le Weser. Le tableau montre les résultats obtenus en donnant successivement à ce terme les valeurs 1,30 et 1,50; mais ce n'est qu'une approximation assez grossière des nombres qui existent en réalité. Quant à la formule de M. Wheeler, elle a été appliquée en empruntant au fleuve corrigé la première et la dernière largeurs, ce qui explique la concordance absolue de ces nombres avec les résultats obtenus.

Largeurs données au Weser, en mètres.

Localités	Franzius	Mengin-Lecreulx		Wheeler
		$m = 0,30$	$m = 0,50$	
Brême.	130	130	130	130
Hasenbüren . . .	136	160	165	165
Vegesack. . . .	150	200	210	215
Farge	260	250	270	280
Brake	500	350	415	460
Bremerhaven. . .	1000	700	900	1000

Ce tableau prouve qu'en tenant compte des conditions locales, un ingénieur expérimenté peut calculer avec assez d'exactitude les accroissements successifs à donner à un fleuve à marée, car la concordance est plus que suffisante pour les besoins de la pratique ; mais il faut beaucoup de sagacité et de pratique afin de démêler l'effet que peuvent avoir les uns sur les autres les éléments particuliers.

Gironde et Garonne. — Le fleuve sur lequel est situé Bordeaux, la Garonne, prend le nom de Gironde depuis son confluent avec la Dordogne au bec d'Ambès jusqu'à la mer. De l'Océan à Pauillac, placé vers le milieu de la route, la cote de profondeur minima est 4,50 *m* donnant une mouille de 8,25 *m* aux plus faibles marées de morte eau.

Mais de Pauillac à Bordeaux, plusieurs passes interdisaient le passage des grands bâtiments. L'amélioration a été réalisée principalement par le dragage. Ainsi sur le seuil de Beychevelle en amont de Pauillac, un chenal de 200 mètres de largeur a été creusé à la profondeur de 5 mètres.

L'abaissement de cet obstacle a permis l'entraînement par le courant d'une énorme masse de vase qu'il retenait en amont, et la profondeur obtenue s'est ainsi propagée jusqu'à l'île du Nord sur une longueur de 20 kilomètres. La plus grande difficulté a été l'enlèvement d'un banc rocheux situé à la cote — 3,50 *m*.

La passe du bec d'Ambès était la plus dangereuse de toutes, à cause de son peu de profondeur et de sa mobilité. L'île Cazeau rejetait la Garonne vers la Dordogne sous un angle trop prononcé ; la régularisation fut effectuée par le rescindement de l'île. Il eût peut-être mieux valu l'exécuter en une courbe concave, mais cette solution entraînait de grandes dépenses et la coupure a été exécutée suivant une ligne droite de 12 kilomètres qui entame également l'île du Nord et l'île Verte en aval.

La consolidation du bec s'effectuait en même temps sur 600 mètres de longueur. On a pu obtenir ainsi un chenal présentant 3 mètres en basses eaux.

Signalons que le dragage de l'île Cazeau s'est effectué dans des bassins clos par une bande du sol lui-même conservée le long de la rive.

Les bancs Carriet, Bassens, Bacalan, situés plus en amont, ont été également approfondis à près de 4 mètres.

EMBOUCHURE DES FLEUVES A MARÉE

On a indiqué les procédés qui peuvent être employés pour l'amélioration du lit de la partie maritime des fleuves soumis à la marée ; les mêmes principes sont-ils applicables à l'embouchure ?

Celle-ci est précédée de ce que l'on appelle en général l'estuaire, partie élargie, véritable bras de mer auquel les Américains du Nord donnent même le nom de baie. La largeur en est souvent considérable et ne saurait servir de base pour l'application à la portion à rives parallèles d'une formule comme celle de M. Wheeler, car cet estuaire élargi se trouve le plus souvent dans de mauvaises conditions, étant encombré de bancs de sable où serpentent plusieurs chenaux sans profondeur.

Pour que le débit du jusant soit capable de creuser un lit dans l'estuaire, celui-ci doit avoir une largeur bien proportionnée ; elle peut s'obtenir par des levées longitudinales limitant un seul chenal et y concentrant le courant.

La difficulté réside justement dans la proportion de la largeur avec le service que la marée doit effectuer en amont et qui consiste sinon à creuser du moins à entretenir les profondeurs. La plupart des ingénieurs professent que le meilleur système est de continuer jusqu'à la mer les élargissements donnés au lit supérieur; mais en fait il n'y a encore eu aucune application de ce genre. Les fleuves qui ont naturellement l'embouchure « en entonnoir » sont les uns en bonne situation (Tamise, Humber) les autres en mauvais état (Seine, Loire). Le mal, pour ces derniers, vient de leur largeur excessive. Obtiendrait-on à coup sûr un bon résultat en la diminuant tout en conservant la forme évasée?

Un savant ingénieur, M. Partiot, n'a cessé de soutenir la thèse opposée. Pour lui, les fleuves dont l'embouchure est rétrécie et qui présentent intérieurement un vaste réservoir sont ceux qui offrent à l'entrée les plus grandes profondeurs, lesquelles se continuent jusqu'à une certaine distance en dedans et en dehors de la passe.

Théoriquement, il est évident que la réduction de l'émissaire d'évacuation doit augmenter la vitesse du courant et par conséquent sa puissance d'affouillement; alors le flot et le jusant peuvent créer chacun en amont et en aval du goulet une fosse plus ou moins étendue, suivant la nature et la forme du terrain, les profondeurs, etc.

Mais en pratique ce principe d'apparence si simple est modifié par les circonstances. L'entretien ou l'amélioration des profondeurs sont dus principalement à la chasse produite par le jusant; il importe donc avant tout, on l'a vu, d'augmenter le volume introduit par la marée et tout au moins de ne pas le diminuer. Certes, le rétrécissement de la largeur peut être compensé et au delà par l'augmentation de la profondeur, de façon à ne pas restreindre la section de l'embouchure; en effet, le volume introduit est fonction de l'aire de la section d'une part, de la vitesse d'introduction de l'autre. Or celle-ci dépend du rayon hydraulique, qui s'accroît avec la profondeur.

Seulement si la vitesse du jusant est alors augmentée, celle du flot le sera également. Il y a lieu dès lors de craindre que le courant ascendant n'entraîne dans l'estuaire un volume plus considérable d'apports qui, y trouvant un repos relatif, s'y déposent et en diminuent la capacité, au détriment des effets espérés.

Ces dépôts peuvent s'effectuer non seulement dans un vaste estuaire, mais même dans un fleuve à rives parallèles, où cependant la vitesse du

courant est plus uniforme. C'est ce qui s'est passé dans la Demerara (Guyane anglaise) (fig. 291). L'embouchure y a été rétrécie de moitié dans l'espoir que la chasse produite pourrait creuser un chenal à travers la barre. Le chenal se creusa bien en effet, en amont et en aval du goulet, mais ne s'étendit pas jusqu'à la barre qui resta intacte. Seulement, au bout de peu d'années il s'était formé tout le long de la rive, derrière le môle, un vaste banc qui, diminuant le volume du prisme de marée introduite, a eu pour résultat un exhaussement sensible de la barre.

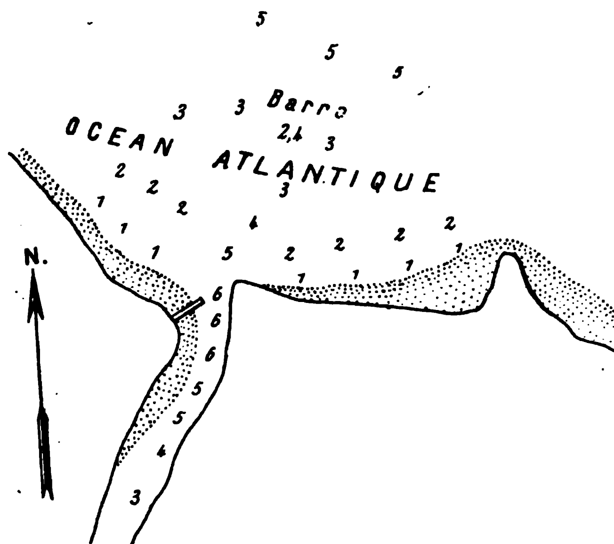


Fig. 291. — Rivière Demerara.

On a, à l'appui de la théorie des embouchures rétrécies cité un certain nombre d'exemples de fleuves ainsi constitués et présentant de grandes profondeurs. Nous avons discuté ailleurs la valeur de ces exemples; il serait aisé de citer aussi de nombreux cas de goulets n'occasionnant aucun approfondissement; mais le cadre de cet ouvrage ne comporte pas l'examen complet de ces questions spéciales.

Ici, comme partout, il n'y a rien de général. Le rétrécissement du débouché d'un fleuve sera parfois le meilleur procédé d'amélioration; d'autres fois il conduira à un insuccès certain; les résultats dépendent des conditions locales. Si le sable vient en grande quantité de la mer, si les courants de marée et les vents le poussent dans l'estuaire, la création du goulet sera nuisible. Mais si l'estuaire n'est pas exposé à se

combler, si la barre est assez voisine pour qu'on puisse diriger sur elle le courant renforcé par la convergence, il y a tout lieu d'espérer l'amélioration désirée.

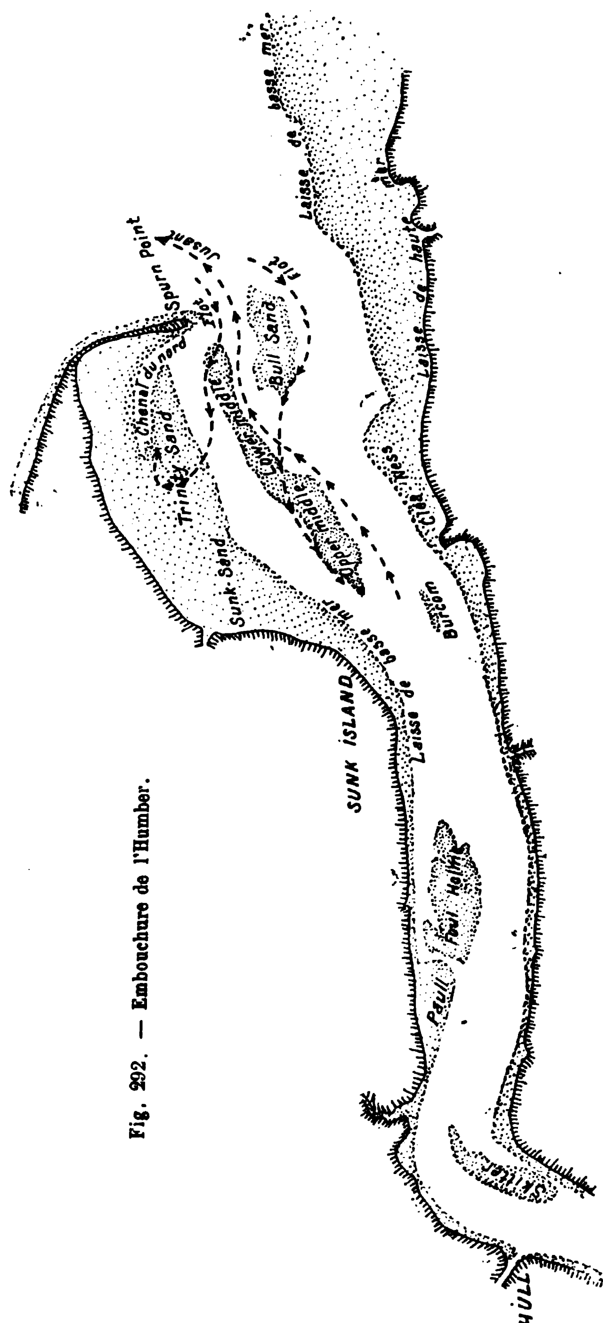


Fig. 292. — Embouchure de l'Humber.

Etude de l'Humber. — L'étude de la rivière Humber nous paraît d'un haut intérêt dans la question.

L'Humber est l'émissaire du plus grand bassin fluvial de l'Angleterre. Il débouche sur la côte orientale dans un vaste estuaire fermé en partie par le cordon littoral émergé connu sous le nom de Spurn-Point. C'est un banc de sable et de galet qui continue la côte septentrionale ; sa largeur n'est que de quelques mètres à son point de jonction avec la terre et atteint environ 150 mètres à son extrémité. Il a été formé par les débris des falaises au sud du cap Flamborough et a augmenté de 2500 mètres depuis l'an 1676. Son sommet atteint 6 mètres au-dessus du niveau de l'eau.

L'embouchure était jadis comprise entre Spurn Point au nord et un autre promontoire immergé, Cly ou Clea Ness au sud. A mesure que le premier s'est avancé au sud, le second s'est retiré et aujourd'hui sa longueur n'est plus guère que du tiers

de la primitive; les cartes de diverses époques montrent qu'à basse mer la distance entre les deux pointes a été presque invariable, environ 5 kilomètres et demi.

La largeur du fleuve est de 2 500 mètres devant Hull à 12 kilomètres de l'embouchure et de 210 mètres à Goole à 70 kilomètres au-dessus. La marée atteint 5,75 *m* d'amplitude et se propage jusqu'à Naburn.

L'inspection du plan (fig. 292) montre que de Sunk Island jusqu'à Spurn Point la laisse de basse mer forme une ligne presque continue, tandis que celle de haute mer s'écarte de chaque côté et constitue un vaste bassin de plus de 10 kilomètres de largeur.

De Sunk Island à Hull, ou plutôt Kingston-on-Hull, les rives sont presque parallèles et le chenal navigable pour les grands navires s'étend sur 80 kilomètres. Il n'en a pas toujours été ainsi. Les cartes anciennes indiquent que l'estuaire s'élargissait autrefois depuis Hull. Il s'est peu à peu comblé par la soudure de nombreux bancs à la terre. La capacité du bassin intérieur à Spurn Point a été ainsi diminuée des trois quarts.

Et ce fleuve « le modèle des fleuves » a ainsi façonné lui-même son lit, lui donnant naturellement, sans l'intervention d'aucune œuvre d'art, la forme que M. Wheeler a prise pour type et dont il a fait la base de sa formule d'amélioration. Le résultat de ce comblement pour ainsi dire scientifique a été une augmentation constante dans les profondeurs. C'est là un exemple qu'on ne saurait trop méditer.

Aujourd'hui derrière le barrage de Spurn Point existe encore, à haute mer tout au moins, un vaste bassin et quelques ingénieurs français attribuent à ce réservoir l'état si satisfaisant du fleuve. Cette opinion n'est partagée par aucun ingénieur anglais ; au contraire, tous sont d'avis que l'endiguement du bassin latéral, de Sunk Island à l'extrémité de Spurn Point, non seulement ne serait pas préjudiciable à l'Humber mais lui serait favorable. L'un des plus justement célèbres, sir John Coode, attaché dix ans aux travaux du fleuve, a écrit « qu'il était prouvé sans contestation que la proportion d'eau de marée qu'on excluerait en comblant cette partie de l'estuaire, ne serait que de 2 °/₀ du volume total ». Il est clair que dans ces conditions, l'effet de cette infime diminution serait nul sur la valeur de la chasse du jusant.

Mais à un autre point de vue, elle aurait une importance considérable. Entre Spurn Point et la rive droite du fleuve, au milieu de l'embouchure, existe un banc de sable, Bull Sand, sur lequel il ne reste à basse mer que 3,50 à 5,50 *m* d'eau, tandis qu'on sonde 11 mètres au sud,

12 mètres au nord du banc et même 21 mètres contre la pointe. Il en résulte pour les courants de marée des divagations. Celui du flot se dédouble. La branche qui pénètre par le chenal du nord tourne autour de la pointe et se précipite dans le bassin latéral, puis revient sur elle-même en tourbillonnant. Son action s'amortit à creuser derrière le barrage un faux chenal, dit du nord.

La branche du sud contourne le Bull Sand et ne remonte le lit du fleuve qu'après avoir rebondi contre la rive septentrionale de la crique et décrit trois courbes plus ou moins sinusoïdales. Evidemment dans ces inflexions le flot perd de sa force et par conséquent de sa puissance d'affouillement.

Spurn Point agissant comme un épi, la vitesse du courant est augmentée à son extrémité ; aussi est-elle de 2 mètres par seconde dans la branche nord du flot, tandis qu'elle n'atteint pas la moitié dans l'autre. Le chenal du nord est donc plus creux à son extrémité et l'ebbe s'y dirige naturellement. Il y a dans ces partages une perte de puissance considérable ; il se produit en outre des courants traversiers auxquels sont dus sans doute le Bull Sand et les bancs désignés sous le nom de Upper Middle et Lower Middle.

Il est très probable qu'en faisant disparaître ce qui reste du Clea Ness et en régularisant le cours du fleuve par une levée parallèle à la rive droite, de la pointe de Sunk Island à l'extrémité de Spurn Point, on assurerait au flot et au jusant un seul chenal. Il est à espérer que les bancs (Middle et Bull) disparaîtraient naturellement et que les profondeurs augmenteraient.

Certes, dans le cas de l'Humber, de tels travaux ne sont pas à conseiller. La situation est bonne et il serait peut être téméraire de la modifier en vue d'une amélioration toujours aléatoire. Mais il est opportun de répéter que les ingénieurs anglais les plus réputés estiment que le résultat serait assurément favorable. S'il s'agissait d'un fleuve moins favorisé, nous croyons que l'hésitation ne serait pas permise.

EXEMPLES D'AMÉLIORATION D'EMBOUCHURES DE FLEUVES A MARÉE

La Liffey (pl. IX, fig. 1). — La Liffey, qui se jette dans la baie de Dublin est une petite rivière dont le débit est insignifiant. Son embouchure est tracée au milieu de deux grands bancs de sable, les North et South Bulls. Celui du sud était le plus nuisible, étant poussé vers le chenal par les vagues.

L'amplitude de la marée est de 4 mètres.

De 1748 à 1768 fut construit le môle du sud, appelé communément la Grande Muraille, long de près de 5 kilomètres et terminé au phare de Poolbeg. Il continue la rive droite de la Liffey et dépasse de deux mètres le niveau des plus hautes eaux.

L'effet sur la barre, dont la profondeur au-dessous de l'eau était de deux mètres, fut peu important; il se produisit un léger affouillement au sud, au contraire un relèvement du fond au nord; mais les empiètements du South Bull furent arrêtés.

De 1819 à 1824 fut construit en enrochements le môle nord, enraciné à deux kilomètres du premier. Sa longueur est de 2 750 mètres; il converge vers l'autre et laisse entre leurs musoirs une passe de 300 mètres de largeur. Sur les 1 700 premiers mètres sa hauteur dépasse de deux mètres le niveau des hautes eaux, il s'abaisse ensuite de ce niveau jusqu'à 30 *cm* au-dessous de celui de basse mer et se termine enfin en plongeant dans le sable à 7,50 *m* de profondeur.

L'avant-port circonscrit entre les deux môles a une surface de près de mille hectares, y compris pour une faible part les portions de la rivière où s'emmagasine aussi la marée. Le volume qui y pénètre est de 25 millions de mètres cubes. La vitesse maxima de sortie atteint 2 mètres à la seconde.

Ce cube d'eau n'agit pas toujours sur la même surface. Au commencement du jusant, la masse sortante passe aussi bien par-dessus les portions immergées du môle nord que dans l'entrée. La largeur totale est alors de 1200 mètres; mais elle se contracte peu à peu. D'ailleurs la vitesse est toujours plus considérable dans le chenal, où le rayon hydraulique est plus grand.

Les résultats n'ont été obtenus qu'après de nombreuses années, à cause de la lenteur du transport du sable.

L'augmentation de la profondeur d'eau a suivi la progression suivante :

1819.	2 mètres	1856.	4 mètres
1822.	2,60 —	1873.	4,85 —
1828.	3 —		

Ces profondeurs se sont maintenues jusqu'en 1880, mais il semble qu'il y a maintenant une légère décroissance.

La figure 293 donne l'état du chenal en 1873. L'approfondissement s'est surtout dessiné à l'extérieur des môles. A l'intérieur, le dragage

a été employé sur une petite échelle. La machine a aussi servi à approfondir l'avant-port en dehors du tracé du chenal, de façon à augmenter le volume de marée.

Le succès obtenu à Dublin est donc considérable. Un dragage énergique rendrait le port accessible à tout état de marée, mais l'importance du trafic n'en justifierait pas la dépense.

Le môle nord, qui a déterminé l'amélioration et qui ne l'aurait d'ailleurs pas obtenue sans la présence de celui du sud, est submersible sur son dernier kilomètre.

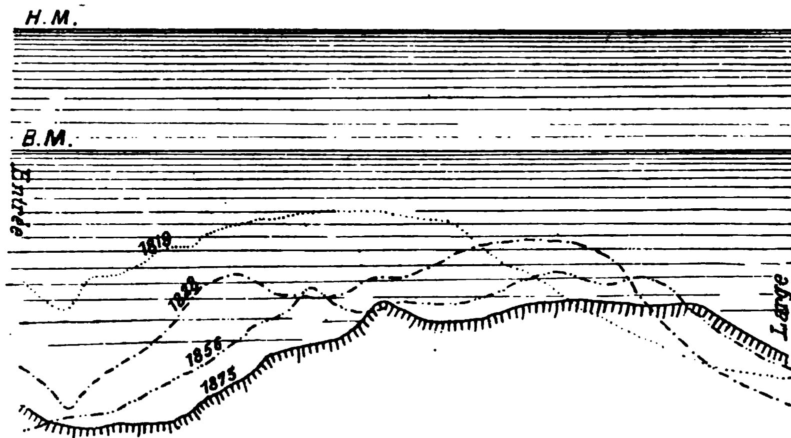


Fig. 293. — Chenal de la Liffey en 1873.

L'ingénieur qui l'a prévu, Giles, n'a pas donné le motif de cette disposition. Un de ses successeurs, M. Mann, pense que le but était seulement de permettre à une partie du cube de marée de s'écouler au jusant en dehors du chenal où autrement la vitesse aurait été trop considérable pour la manœuvre des navires. Il faut remarquer que la vitesse maxima se produit à mi-marée et qu'à ce moment la section d'écoulement est déjà très réduite; l'inconvénient signalé serait donc minime et la concentration de toute l'énergie du jusant par l'élévation du môle au-dessus du niveau de haute mer aurait certainement produit un approfondissement plus considérable.

Le but était-il de faciliter l'introduction du flot ainsi qu'il a été présumé? L'introduction d'un volume de 25 000 000 de mètres cubes en 6 heures exige une moyenne d'un peu plus de 1 000 cubes par seconde et pour une entrée de 300 mètres de largeur et 6 mètres de profondeur, la vitesse moyenne nécessaire au remplissage n'eût pas atteint 60 *cm*. L'abaissement du môle ne paraît donc pas nécessaire.

L'accroissement du tonnage à chaque époque indiquée ci-dessus est marqué par les nombres suivants en milliers de tonneaux :

1819	340	1856	950
1822	366	1878	1600
1828	472		

La Clyde. — La Clyde est une petite rivière qui débouche dans un estuaire protégé, de sorte qu'il n'y existe pas de barre. Jusqu'en 1768, elle comptait de nombreux seuils avec seulement 40 *cm* d'eau. En cette année, John Golborne commença l'établissement d'épis transversaux en enrochements, en même temps qu'il enlevait les bas-fonds par le hersage et le dragage et arrivait ainsi à obtenir une profondeur minima de 1,80 *m*.

De 1781 à 1836, le nombre des épis fut augmenté et leurs extrémités reliées par des levées longitudinales encaissant complètement le lit. Le mouillage atteignit 4,50 *m*.

Le lit artificiel avait reçu une forme régulièrement évasée vers l'aval; la largeur, fixée à 55 mètres à Glasgow, devait atteindre 210 mètres à Dumbarton Castle, distant de 8 kilomètres de la mer; mais ces dimensions furent portées bientôt respectivement à 115 et 300 mètres. Mieux eût valu élargir davantage, car la rivière elle-même ne compte guère dans ce système d'amélioration.

Les dragages allaient de pair avec l'encaissement. L'enlèvement des seuils, créant une pente uniforme, permettait l'accès d'un volume de plus en plus grand d'eau de marée et augmentait l'action du courant sur le fond. En 48 ans, de 1844 à 1892, il fut dragué 30 millions de mètres cubes, dont 1 200 000 mètres dans la dernière année. Depuis longtemps ces matériaux sont jetés à la mer; auparavant ils servaient de remblais derrière les quais.

Aujourd'hui, le fond du fleuve est horizontal et présente partout de 5 à 6 mètres en basses eaux et jusqu'à 8,25 *m* à haute mer. La marée, rencontrant cet estuaire sans pente, s'y répand aisément. Aussi, tandis que la mer marnait jadis de 2,15 *m* à Glasgow et de 3,35 *m* à l'embouchure, la proportion est maintenant renversée; elle ne s'élève plus que de 2,80 *m* en aval et atteint 3,40 *m* à Glasgow. L'établissement du port a également changé. Il retardait autrefois de 1,23 *h* à Glasgow sur celui de l'embouchure; le retard n'est plus guère que d'une heure.

L'exemple de la Clyde ne peut être cité que comme une exception; à proprement parler il ne s'agit pas là de l'amélioration d'une rivière;

on n'avait pas à lutter contre les grands ennemis, la barre et les apports marins ou fluviaux. Le lit où opèrent et se construisent tant de navires n'est pas autre chose qu'un canal artificiel creusé à force de dragages : « C'est Glasgow qui a fait la Clyde et la Clyde a fait Glasgow » disent les Anglais.

La Tyne (pl. XI, fig. 1). — La Tyne diffère essentiellement de la Clyde à son embouchure ; elle se jette directement dans la Mer du Nord, qui entassait une barre devant son estuaire, tandis que le fleuve de Glasgow débouche dans un golfe protégé et libre d'obstacles. La Tyne a donc pu être améliorée par les procédés qui ont si bien réussi dans la Clyde, encaissement du lit et dragages énergiques, mais il a fallu de plus aménager l'entrée par des ouvrages spéciaux.

Dans la rivière on a commencé par établir des épis transversaux en charpente, dont les extrémités ont été ensuite reliées par deux levées en enrochements. L'exemple de la Clyde fit éviter l'erreur commise en aval de Glasgow, et la largeur entre les levées a de prime abord été projetée suffisante.

Le résultat produit par le seul jeu des marées, dont l'amplitude maxima est 3,30 *m*, et du courant de la rivière, si faible qu'en soit le débit, fut un approfondissement de 1,20 *m* sur les seuils les plus élevés. Ce succès décida l'exécution d'un vaste programme dressé en 1860. La barre n'avait alors que 1,80 *m* d'eau à basse mer ; sa longueur était de 240 mètres et la passe mesurait 180 mètres de largeur.

On construisit devant l'embouchure un avant-port au moyen de deux môles convergents, espacés à terre de 1 400 mètres et laissant entre leurs musoirs une entrée de 540 mètres de largeur qui sera encore rétrécie. Des deux môles, celui du nord a 825 mètres de longueur et atteint les fonds de 11 mètres ; l'autre a 1430 mètres et s'arrête à la profondeur de 9 mètres, profondeur encore suffisante pour que l'action de la vague ait peu d'effet sur les sables du fond. Les môles dépassent de beaucoup l'emplacement de la barre.

Dans l'avant-port les lames perdent leur violence ; elles y déposent leurs apports, et c'est dans cette eau relativement tranquille que s'effectuent les dragages destinés à extraire aussi les alluvions de la rivière, également arrêtées par le calme du bassin.

De 1838 à 1890 il a été enlevé 90 millions de tonnes de déblais ; aujourd'hui l'extraction annuelle monte encore à plus d'un million et

demi de tonnes. Les matériaux dragués sont jetés à la mer dans les fonds supérieurs à 35 mètres.

La profondeur minima est maintenant de 6 mètres au-dessous des basses eaux, profondeur qui se continue jusqu'à Newcastle, où l'établissement du port a avancé de près de trois quarts d'heure. Le niveau des hautes mers s'est élevé de 30 *cm*, celui de basse mer s'est abaissé de plus d'un mètre, et l'on estime à près de huit millions de mètres cubes le volume supplémentaire d'eau qui entre à chaque marée.

L'avant-port sert de port de refuge à de nombreux navires.

La Tyne est un remarquable exemple de rivière améliorée ; elle l'a été par les procédés combinés d'encaissement et de dragage ; mais il faut ajouter qu'elle se trouvait dans des conditions favorables. Le lit est rocheux à faible profondeur, le cours est rapide ; la plage sablonneuse devant l'embouchure est plate et stable ; les courants littoraux sont faibles et il ne se trouve pas de grands bancs dans le voisinage.

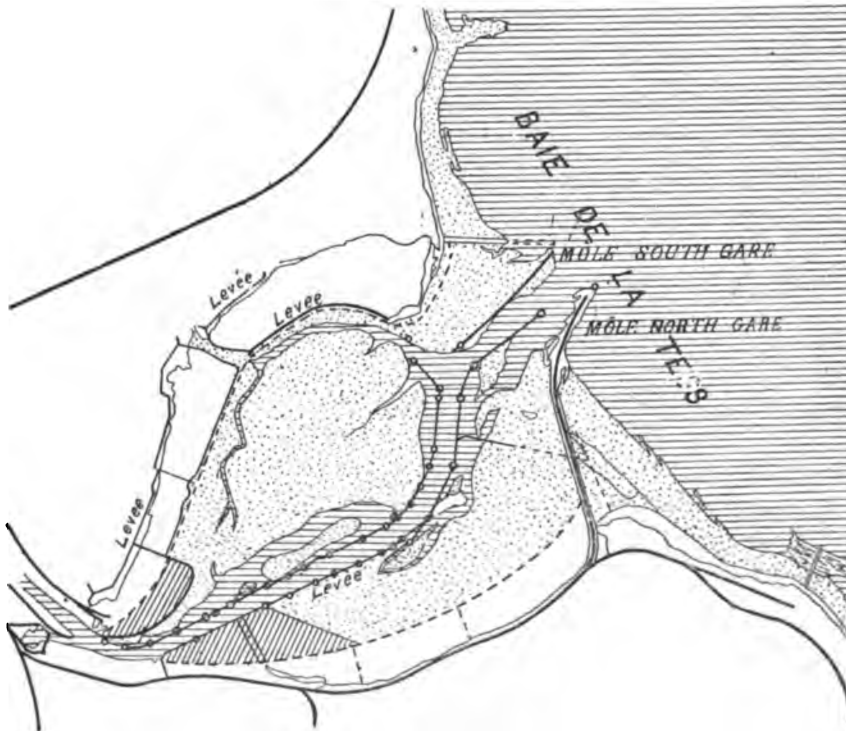


Fig. 294. — Embouchure de la Tees.

La Tees (fig. 294). — La Tees était un ruisseau divisé en quatre chenaux entre Middlesbrough et la mer : chenaux tortueux, étroits, encom-

brés. Sur la barre il n'y avait qu'un mètre d'eau ; aujourd'hui il y en a six, soit plus de 11 mètres à haute mer de vive eau. Comme à la Tyne, on a construit un avant-port dont les môles d'enceinte dépassent la barre qui a pu y être draguée. De ces môles l'un, le South Gare Breakwater (1863-1894), a près de 4 kilomètres de longueur ; l'autre a 1 800 mètres; ils laissent entre eux une entrée provisoire de 600 mètres, qui sera diminuée.

De plus, la rivière a été encaissée entre des levées construites comme les môles en blocs de scories provenant des hauts fourneaux voisins, qui payaient 50 centimes par tonne enlevée. Les levées sont submersibles ; elles ne dépassent que de 1,20 *m* à 2,10 *m* le niveau des basses eaux. On les a commencées il y a 40 ans et elles atteignent un développement de 40 kilomètres.

Enfin les dragages effectués s'élèvent à 30 millions de tonnes.

Le succès a donc été obtenu par les mêmes procédés qu'à la Tyne.

Blyth (fig. 295).— L'amélioration de la rivière Blyth, qui débouche sur la côte du Northumberland, est également instructive. Sur cette plage sablonneuse, les jetées parallèles du port s'étendaient à une faible distance au delà de la laisse des basses mers, et il existait à l'entrée une barre sur laquelle la profondeur d'eau variait de 30 *cm* à 1,20 *m* ; la plus faible profondeur se rencontrait après les tempêtes du SE et la plus grande après les dragages de l'été. L'amplitude de la marée est de 3,20 à 4,40 *m*.

La barre était évidemment due à l'action de la vague des tempêtes du SE ; on a vu, en effet, la profondeur passer de 1 mètre à 30 *cm* pendant une de ces tempêtes, tandis qu'elle se maintenait invariable à plus d'un mètre pendant la saison calme, même malgré des crues de la rivière. Ce fait prouve également que les courants littoraux n'intervenaient pas dans la formation de l'obstacle.

Le sable de la barre était le même que celui du rivage du sud et de la baie. Le fond de la rivière, au contraire, était formé de vase que les crues entraînaient en grande quantité, sans qu'elle s'arrêtât jamais sur la barre.

Les travaux d'amélioration commencèrent par l'enlèvement d'un large banc de rochers, à sec pendant la basse mer. Les jetées, allongées de 100 mètres, permirent de creuser à la machine le chenal sur une largeur de 27 mètres et une profondeur de 3,60 *m*.

Des dragages effectués pour former des souilles aux bâtiments dans le port intérieur augmentèrent encore le volume du prisme de marée :

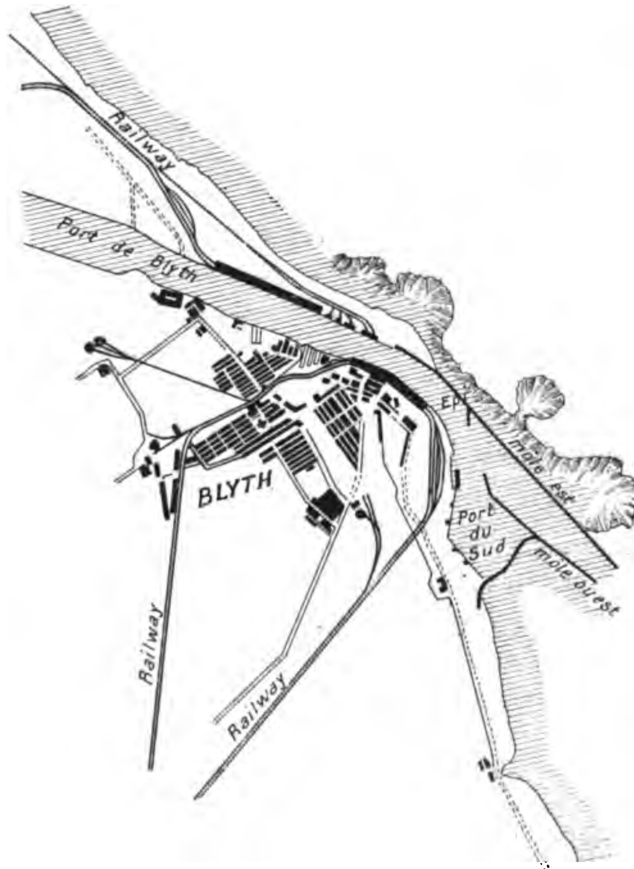


Fig. 295. — La Blyth.

il en résulta que l'amélioration obtenue dans le chenal s'est maintenue et même augmentée. Un nouvel allongement de la jetée est sur 30 mètres de longueur a complété l'amélioration. Blyth reçoit maintenant des navires de 4 000 tonneaux au lieu de 1 500 et l'exportation de charbon a passé de 150 000 à 1 500 000 tonnes.

La Meuse (pl. XIII, fig. 1). — La nouvelle Meuse, après avoir passé à Rotterdam, se jetait jadis dans la Mer du Nord par deux bras : au Nord, le Scheur, qui débouchait derrière le Hoek von Holland, en faisant un crochet vers le sud-ouest ; au sud le Botlek qui se sépare du Scheur vis-à-vis Vlaardingen et aboutit près de Brielle. Ces voies ensablées ne permet-

taient l'arrivée à Rotterdam que de navires de faible tirant d'eau. L'accès du port a été facilité par la création d'un nouveau lit qu'ont déterminé le barrage du crochet du Scheur et la continuation de ce bras en ligne droite vers le nord-ouest au moyen d'un canal creusé à travers les sables de la plaine dite Hoek von Holland. Ce tracé a été adopté parce que la plage où aboutit le canal est libre de bancs et présente un talus prononcé, qui a permis de diminuer la longueur des jetées exécutées en pleine mer.

L'économie générale du projet était la suivante :

Le nouveau lit s'élargissait de l'amont à l'aval, de façon à avoir 225 mètres à Krimpen situé à 11 kilomètres au-dessus de Rotterdam, 330 mètres dans la traversée de cette dernière ville, 450 mètres à Vlaardingen et 900 mètres à l'extrémité des jetées. De celles-ci, celle du Nord a 2 000 mètres et l'autre 2 300 mètres ; elles atteignent la courbe des fonds de 5 mètres. On espérait obtenir une profondeur de 6,50 *m* ; le projet était estimé 12 500 000 francs.

Les jetées commencées en 1863 furent terminées, celle du nord en 1874, l'autre en 1876. En 1868, le Hoek fut coupé sur une largeur d'abord de 10 mètres, puis de 50 mètres, par un chenal de 3 mètres de profondeur au-dessous des basses mers. Le barrage du crochet du Scheur fut terminé en 1872. On comptait que le courant suffirait pour élargir et creuser le lit définitif.

L'effet attendu commença en effet à se produire et cinq millions de mètres cubes de sable furent emportés ; mais ils se déposaient entre les jetées. En 1877, malgré une dépense de 25 millions de francs, le chenal ne s'était pas creusé.

Une Commission émit alors l'avis que seul le dragage pouvait ouvrir le lit projeté, qui d'ailleurs paraissait trop large, au moins vers son extrémité d'aval. L'écartement entre les jetées fut réduit à 700 mètres par la construction d'une troisième, maintenue basse en dedans de celle du sud. Enfin, l'ouverture du Botlek fut encore diminuée à 70 mètres afin de déterminer le passage d'un volume d'eau plus considérable dans le chenal. Un certain nombre de courbes qui gênaient la marche des filets liquides furent rectifiées.

La drague a eu, comme on devait s'y attendre, raison des sables dont elle a enlevé plus de 40 millions de mètres cubes. Aujourd'hui le chenal présente sur son axe des profondeurs continues minima de 8 mètres,

et le développement commercial de Rotterdam est assuré. Le coût total a dépassé 75 millions de francs.

L'amélioration de l'embouchure de la Meuse se présentait dans de bonnes conditions. La mer n'est jamais très forte sur la côte de Hollande ; le mouvement du sable y est restreint et même il n'en entre pas de la mer dans le canal. Celui qui se dépose entre les jetées vient de l'intérieur. Le débit du fleuve est considérable — nous ne le connaissons d'ailleurs pas exactement, n'ayant trouvé nulle part le renseignement.

L'amplitude de la marée n'est, il est vrai, pas très grande : 1,70 *m* en moyenne ; mais les marées de tempêtes dépassent 3 mètres et déterminent de violents courants qui ont puissamment contribué au succès. Même le régime ordinaire suffit pour l'entraînement du sable et les courants en dehors des musoirs les emportent assez loin. Aussi les fonds de la mer ont-ils peu varié, et seulement jusqu'à la courbe de 10 mètres.

Mais il semble que l'accroissement des largeurs vers l'aval est trop considérable. Le volume d'eau introduit par la marée ne doit pas être très grand, et son rapport avec le débit propre du fleuve ne peut être que minime. Etait-il nécessaire de prévoir entre les jetées une largeur quatre fois plus grande qu'à Krimpen, et qui a été exécutée plus que triple, pour une longueur de 40 kilomètres seulement ?

La formule de M. Mengin-Lecreulx ne donne même pas pour ces largeurs un rapport double. Avec 400 mètres de distance entre les jetées ne se serait-on pas trouvé dans de meilleures conditions ? La dépense eût peut-être été moindre et l'entretien sans doute plus facile.

Ajoutons que l'ingénieur du canal de Hoek von Holland est systématiquement opposé à l'application du calcul aux projets de régularisation des estuaires.

Estuaire de la Seine (pl. XIII, fig. 4). — Les levées qui ont délimité le lit de la Seine jusqu'à Berville étaient terminées en 1867 et postérieurement un seul petit travail avait été effectué, celui du rattachement de la levée de la rive gauche à Grestain. L'arrêt avait eu pour cause les appréhensions du port du Havre, effrayé des dépôts considérables signalés dans l'estuaire après la reconnaissance hydrographique de 1875. D'après les conséquences tirées des cubatures effectuées à cette époque et de leurs comparaisons avec les sondages antérieurs, il semblait devoir résulter qu'au bout de vingt à trente ans l'envahissement total de la baie serait

un fait accompli, sauf au chenal. Il y a vingt-cinq ans de cela et l'estuaire n'est guère aujourd'hui en plus mauvais état qu'à cette époque.

Il est impossible d'entrer dans un ouvrage comme celui-ci dans le détail très compliqué des phénomènes dont l'estuaire de la Seine est le théâtre, ni dans la discussion de toutes les théories émises à ce sujet. La solution de l'amélioration de cet estuaire n'est pas, à notre avis, en dehors des moyens dont dispose la science, bien au contraire. Il s'agit seulement de savoir si les intérêts en jeu dans la question valent la peine des dépenses nécessaires et moins encore cette question ne peut trouver sa place ici.

Il est inutile également de discuter les nombreux projets conçus en vue de cette amélioration. Un programme s'exécute aujourd'hui : la levée de la rive gauche se prolonge jusqu'à Honfleur, tandis que celle de la rive droite s'arrêtera à trois kilomètres en amont. Il nous a été impossible de connaître exactement la forme en plan de ces ouvrages. Peut-être se réserve-t-on la faculté de les modifier suivant les résultats qui se manifesteront après la construction de chacune des portions des murs, construction très ralentie à dessein.

Nous croyons cependant que l'idée générale est de diriger l'embouchure vers la passe qui sépare le banc d'Amfard de celui du Ratier, et nous estimons que c'est bien là la direction qu'il faut suivre. Au moment actuel et depuis quelques années déjà le chenal principal a abandonné cette passe pour contourner au nord le banc d'Amfard. Ce n'est pas la première fois que ce fait se produit, mais toujours le chenal est revenu au passage du milieu et c'est toujours là qu'il a acquis les profondeurs maxima. C'est là qu'on se trouve le plus près des grands fonds.

Il y a dans ces faits une indication de la nature qu'il est absolument impossible de négliger.

Une faute originelle a été commise dans le tracé des levées de la Seine dont l'écartement ne croît pas assez rapidement. Il est difficile de la corriger, mais il faudrait se garder d'en commettre une autre. Plusieurs des ingénieurs qui se sont occupés de la question ont été frappés de ce fait déjà signalé page 57, que le lieu des basses mers est plus élevé aux grandes marées qu'à celles de morte eau. Ils en ont conclu que la Seine constituait un réservoir trop grand pour l'orifice par lequel il se remplit et se vide et qu'en conséquence il fallait se préoccuper avant tout d'élargir cet orifice.

La proportion des sections de l'estuaire aux diverses distances de

l'embouchure domine toutes les considérations et l'écoulement complet au jusant du volume entré au flot doit être prévu dans les données du problème. A coup sûr l'orifice de sortie doit être assez large, mais ce n'est pas avant tout qu'il faut s'en préoccuper, c'est en même temps que tout.

Les exemples des autres fleuves améliorés indiquent qu'il faut absolument faire entrer les dragages pour une large part dans l'œuvre entreprise. La quantité d'apports qui pénètre dans l'estuaire de la Seine passe pour provenir d'une source illimitée et défier la puissance des machines. On en disait autant pour la barre de la Mersey. En 1890, dans une discussion ouverte à l'Institution des Ingénieurs civils de Londres à ce sujet, tout le monde était d'accord pour déclarer qu'un dragage serait inefficace; au milieu de l'immense amas d'alluvions qui fermait l'estuaire, que pourrait la machine? L'Ingénieur du port lui-même, dont le mérite est incontesté et qui dirigeait son service depuis trente ans, commençait le dragage quelques mois après sans confiance. Une année suffit pour démontrer non seulement la praticabilité mais la facilité de l'entreprise. Deux ou trois ans plus tard, la barre de Liverpool était abaissée à 8 mètres — résultat merveilleux — et la concentration du courant sur le chenal artificiellement créé enlève si bien le sable à mesure qu'il se présente que la barre n'a aucune tendance à se reformer.

L'embouchure de la Seine ne peut-elle être traitée de la même manière? L'expérience serait peu coûteuse et nous pensons qu'elle serait affirmative.

Weser inférieur (pl. XIII, fig. 3). — En 1891, la régularisation du bas Weser a été commencée. L'estuaire était encombré de nombreux bancs de sable qui divisaient le fleuve en plusieurs bras de peu de profondeur. Les premiers ouvrages exécutés consistent en deux levées rectilignes construites en aval de Bremerhaven. L'une sur la rive gauche (1891-1892) a 7 kilomètres de longueur; l'autre située encore plus en aval, entre Imsum et Wremen, n'a qu'un kilomètre et demi.

Leur effet a été rapide. En deux années, sur une longueur de 20 kilomètres, neuf millions de mètres cubes ont été emportés, dont quatre n'ont du reste que changé de place. Un volume égal a encore été enlevé en 1893-1894. Mais ces déblais en se déposant çà et là ont formé de nouveaux bancs et deux grandes dragues sont employées à leur enlèvement, l'une depuis 1895, l'autre depuis 1898.

Plus en aval, le Weser est encore partagé par le banc Robben en deux bras dont le plus profond est sur la rive droite. Le barrage de l'autre, la construction de levées et le dragage, en minime quantité d'ailleurs, donneront au chenal conservé une profondeur de huit mètres.

Adour.— L'Adour se jette à l'angle extrême du Golfe de Gascogne. Son embouchure, où l'amplitude de la marée n'est que de 2,80 *m*, est encombrée par une barre. Pour la corriger, de nombreux travaux ont été entrepris; d'abord, des levées faisant l'office de quais furent établies en amont de la mer, et elles furent prolongées en 1858 par des jetées en charpente du système de Regi Lagni. Les tarets les ayant détruites, elles ont été remplacées par des jetées en tubes métalliques.

La constitution et la mise en place de ces cylindres seront décrites au chapitre qui concerne les travaux à l'air comprimé.

En substance, la portion de jetée ainsi formée se compose de tubes remplis de béton de 2 mètres espacés de 3 mètres, de sorte que le rapport du plein au vide est celui de 2 à 3. Autour des tubes et dans les intervalles sont versés des enrochements dont le plan supérieur est réglé suivant une pente vers le large d'un centimètre par mètre, son niveau se trouvant ainsi à 3 mètres en contre-bas du niveau des plus basses mers à la dernière colonne. Les tubes sont surmontés d'une passerelle en fer.

On a ménagé entre les cylindres des moises en fer pour recevoir des vannes destinées à fermer les vides en cas de nécessité; en fait, cette disposition n'a jamais servi.

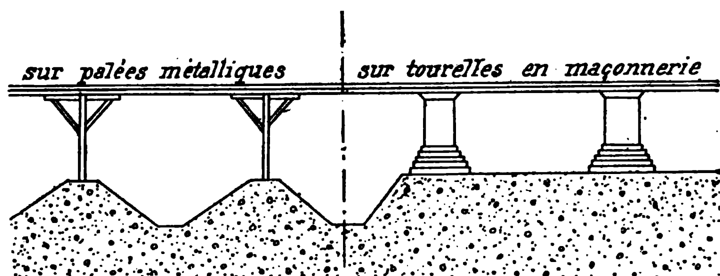


Fig. 296. — Viaduc de l'embouchure de l'Adour.

Les cylindres occupent l'extrémité des deux jetées; leur longueur prévue pour le tronçon qu'ils forment devait être de 250 mètres; on s'est arrêté à peu près aux deux tiers.

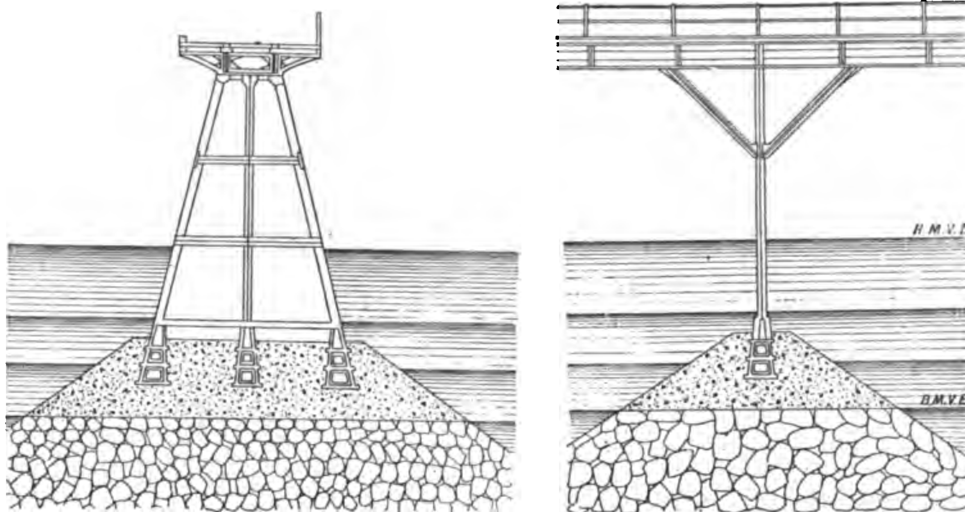


Fig. 297. — Palées métalliques de l'Adour.

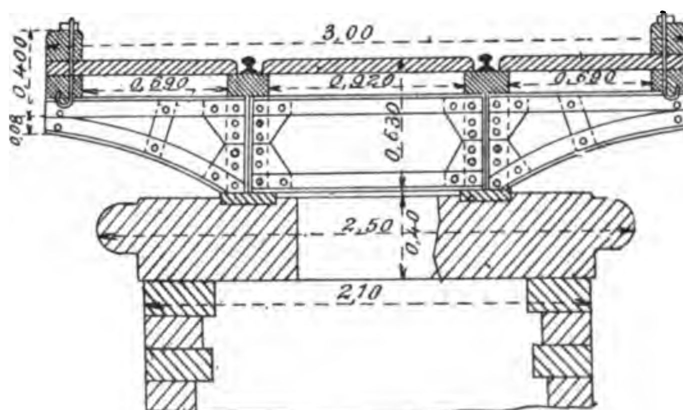


Fig. 298. — Coupe en travers.

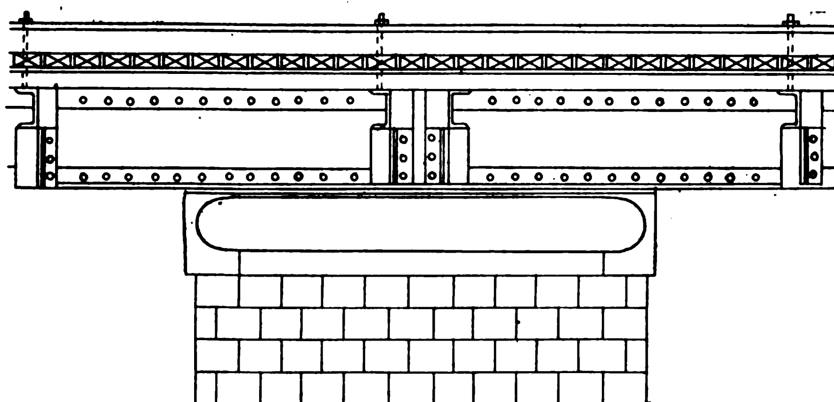


Fig. 298. — Tablier sans tourelles. — Elévation.

Cette portion est reliée à la terre par une passerelle (fig. 296) dont les supports varient du large vers la terre :

1° Sur 300 mètres de longueur à la jetée nord et 180 mètres à l'autre, ce sont des palées métalliques (fig. 297) espacées de 12,50 *m*, enchâssées dans un massif de béton reposant lui-même sur des enrochements arasés à niveau de basse mer;

2° Sur des longueurs respectives comme ci-dessus de 350 et 250 mè-

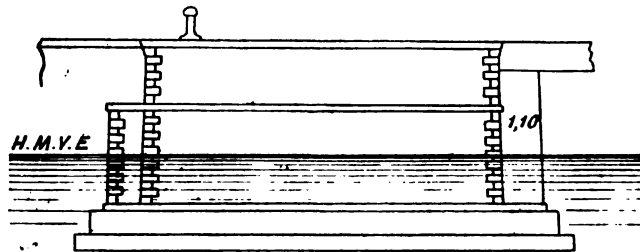


Fig 299.

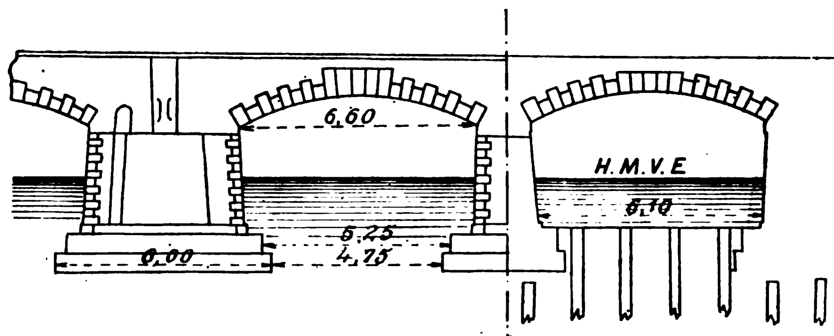


Fig. 299. — Viaduc de la jetée sud.

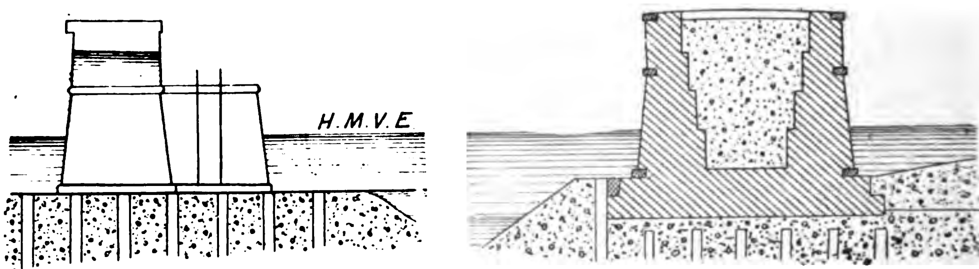


Fig. 299. — Détails divers.

tres, des tourelles cylindriques en maçonnerie de 2,10 *m* de diamètre (fig. 298) également espacées de 12,50 *m*.

La jetée nord est enfin terminée près du rivage par deux viaducs de

trois arches chacun et trois massifs en maçonnerie, formant 120 mètres et se raccordant avec un quai d'égale longueur.

A la jetée sud, le viaduc en maçonnerie a 533 mètres (fig. 299) ; il comprend trois massifs formant culées, 4 piles-culées et 58 arches de 6,60 *m* d'ouverture.

Cet ensemble de travaux n'a guère réussi à augmenter la profondeur sur la barre que d'un mètre environ ; il a fallu recourir à la drague, qui a donné des résultats très avantageux ; mais nous ignorons l'approfondissement obtenu.

Le Nervion (pl. XI, fig. 1). — Le port de Bilbao se compose du lit du Nervion, qui débouche sur la côte de Biscaye, dans une baie étroite et profonde, triangulaire, ouverte au NO. La barre extérieure, formée par les sables provenant de la plage de las Arenas, située sur la rive droite, n'offrait que 1,15 *m* d'eau. Ces sables, poussés par la lame du NO rejetaient sans cesse vers la rive gauche le chenal, qui ne reprenait sa place que durant les tempêtes venant en sens inverse, c'est-à-dire du SO. Pour en fixer définitivement la direction, l'ingénieur, M. de Churruca, n'a établi qu'un seul môle, *sous le vent*. Il pensait avec raison que le courant, naturellement poussé contre cet obstacle, y resterait collé en temps normal et que les lames des tempêtes du SO, arrêtées, ne pourraient plus le rejeter de l'autre côté. C'est ce qui est arrivé ; comme il faut bien que le débit du Nervion, tant d'eau douce que de marée, trouve un écoulement, le courant a creusé un chenal de 80 mètres de largeur limité à l'est par les sables qui se sont alignés comme un second môle ; la profondeur atteinte est de 4,50 *m*, tandis que l'on n'espérait pas plus de 3,50 *m*. Cette amélioration a été obtenue sans le secours du dragage, qui n'a été nécessaire que dans la rivière elle-même.

L'entrée est encore difficile par les mauvais temps. Elle sera désormais protégée par un avant-port que délimitent deux môles ; l'un partant de la côte sud à 2 600 mètres environ de Portugalete mesure 1 450 mètres de longueur ; l'autre, venant de la pointe Begoña au nord, 1 069 mètres. L'entrée est large de 640 mètres ; elle est dirigée perpendiculairement à la direction des vents dominants, qui est tangente aux deux musoirs afin d'assurer le calme. Ce port artificiel, conquis sur la mer et qui n'est pas encore terminé, servira aux opérations des grands navires ; sa superficie est de 287 hectares, dont 205 avec des fonds de 5 à 15 mètres.

L'amélioration du Nervion est un grand succès obtenu par des moyens simples, d'après un programme soigneusement étudié et qui n'a pas varié. La quantité de sable contre laquelle on avait à lutter était d'ailleurs limitée, et le projet a été dressé en conséquence.

Baie de Yaquina (fig. 300). — C'est une étroite crique, de 37 kilomètres de longueur, située sur la côte de l'Orégon ; la superficie couverte par les eaux de marée mesure 12 kilomètres carrés et le débit du

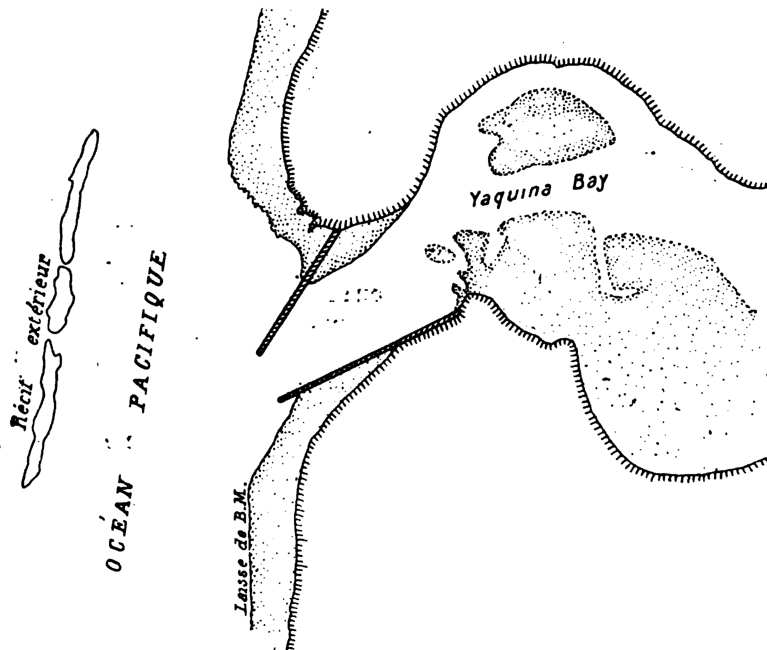


Fig. 300. — Baie de Yaquina.

ruisseau qui s'y jette est de peu d'importance. L'amplitude de la marée atteint en moyenne 2,15 *m* ; aux syzygies le volume qui s'écoule en jusant est de 900 mètres cubes à la seconde. Devant le goulet, qui s'étend entre un cap rocheux au nord et une plage sablonneuse au sud, existait une barre coupée par un chenal de 2 mètres de profondeur et de position très variable. Le mouvement du sable a lieu du sud au nord. A un kilomètre et demi de l'embouchure se trouve un récif sur lequel brisent les vagues, et qui laisse entre lui et la barre un bassin de 8 mètres de profondeur ; cet écueil protège beaucoup l'entrée de la baie contre les apports de sable déterminés par les vagues.

Après des tâtonnements nombreux, l'entrée a été continuée par deux jetées convergentes, écartées de 670 mètres à la racine et de 300 mètres à leur extrémité ; celle du nord est longue de 670 mètres, celle du sud de 1 100 mètres. La place et leur direction ont été choisies d'après les considérations suivantes : l'entrée est inclinée vers le sud, car c'est de ce côté que les navires doublent le récif, et c'est avec cette direction, paraît-il, que la marche du sable est le moins entravée. Le chenal obtenu est profond de 4,30 *m*. Contre la jetée du sud, il s'est accumulé d'énormes quantités de sable. Il y a lieu de craindre que ce sable ne pénètre dans le chenal dont le tracé ne paraît pas le plus avantageux, et n'y forme des bancs. Les travaux n'ayant été que récemment terminés, il est impossible de rien présager au sujet de leur maintien.

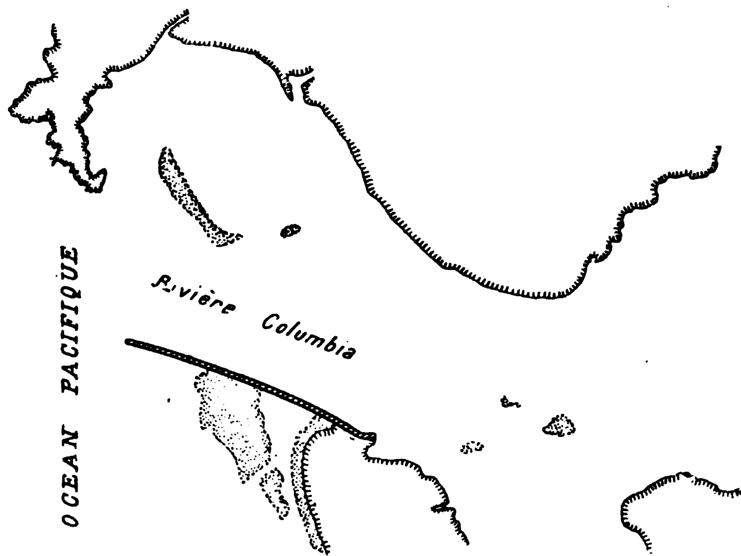


Fig. 301. — Embouchure de la rivière Columbia.

Rivière Columbia (fig. 301). — L'embouchure du fleuve Columbia, dans le Pacifique, ressemble à celle de la rivière de Yaquina. Il y passe au jusant 2 800 mètres cubes d'eau à la seconde : l'amplitude de la marée est de 2,15 *m*. On a rétréci l'entrée par une seule et longue jetée de 6 850 mètres de longueur, sans compter un prolongement de 400 mètres servant de quai.

Les résultats ont été les suivants : au lieu de profondeurs de 5,80 à 6,70 *m* dans plusieurs passes variables, il s'est formé un chenal unique

qui donne un tirant d'eau de 8,75 *m* à 9 mètres sur 1 600 mètres. Le chenal, au milieu, a atteint 9,30 *m*.

Mais l'accumulation du sable à l'extérieur de la jetée est considérable, et il est poussé à l'intérieur par les lames de tempêtes, si bien qu'en 1898 les profondeurs précédentes ont diminué de 30 *cm*.

Westport. — *Nouvelle Zélande* (fig. 302). — Westport est établi sur la côte occidentale de l'île du Sud, à l'embouchure de la rivière Buller ; le débit de 75 mètres cubes à la seconde à l'étiage est considérablement augmenté durant les crues, dont le niveau s'élève à 2,25 *m* au-

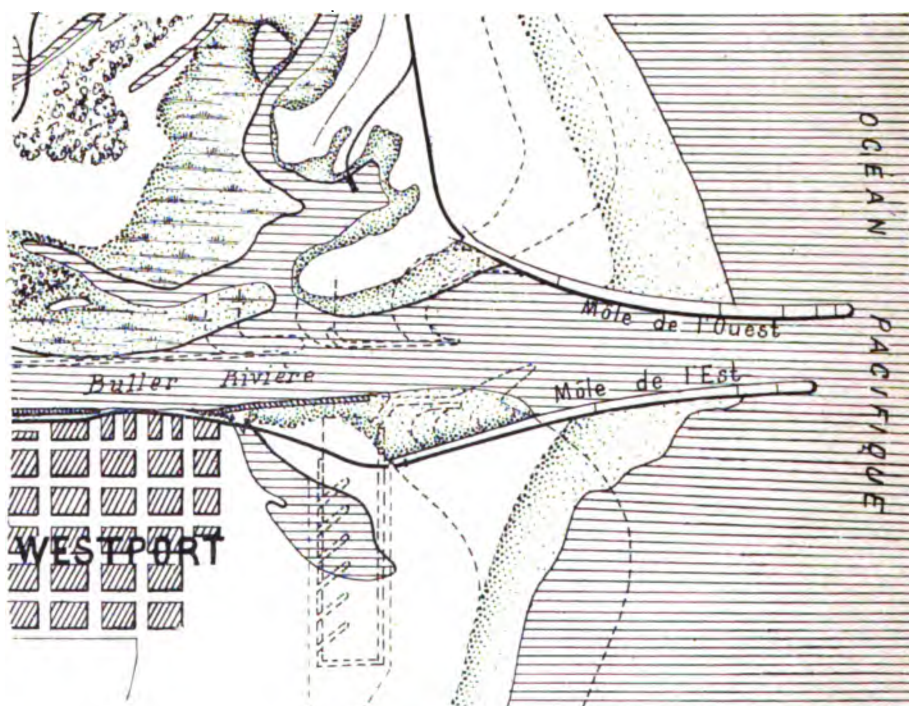


Fig. 302. — Entrée de Westport.

dessus de la surface ordinaire. La mer marne à l'embouchure de 2,90 *m*. La vitesse du cours d'eau est faible. Le tirant d'eau n'était que de 3,30 *m*.

L'amélioration de l'entrée a été obtenue par deux môles convergents distants de 800 mètres à la racine et seulement de 210 à l'entrée. Le môle de l'ouest qui a 1 300 mètres de longueur déborde de 120 mètres l'autre dont la longueur est de 1 440 mètres. Cette disposition est commandée par la direction des vagues, qui viennent de l'ouest.

Le rivage avança rapidement le long de chaque môle, surtout sur la côte occidentale ; mais ce mouvement diminua rapidement à mesure que l'ouvrage arrivait dans les grandes profondeurs ; un fort courant s'est manifesté à l'extrémité du môle le plus exposé à l'invasion des sables, qui sont perpétuellement balayés ; quant au rivage oriental, il n'a progressé que par un léger contre-courant, et aucune crainte ne peut provenir de ce côté.

Du chenal 280 000 tonnes de sable ont été enlevées par le dragage ; le reste a été entraîné par la chasse qu'ont déterminée les travaux et le tirant d'eau s'est élevé à 6,60 *m*.

Le fleuve lui-même a été endigué entre des levées, indiquées en pointillé sur le plan. Elles sont parallèles et s'arrêtent à peu près à l'endroit où sont enracinés les môles. Entre leurs extrémités et la racine des môles il reste deux espaces qui servent de brise-lames.

Cette disposition représentée figure 302 a été employée également avec succès sur un autre fleuve de la Nouvelle-Zélande ; elle corrige l'inconvénient des chenaux à jetées parallèles de conserver aux vagues toute leur hauteur.

EMBOUCHURE DES FLEUVES SANS MARÉE

L'embouchure des fleuves sans marée ne présente nullement les conditions des autres ; on ne peut compter sur l'introduction d'eaux supplémentaires pour renforcer l'action du jusant. Nous passerons d'abord en revue ceux dont l'amélioration a été tentée et tâcherons d'indiquer les procédés à imiter d'après les résultats obtenus dans ces travaux.

Danube (fig. 303). — Le delta du Danube commence à 27 kilomètres au-dessous de la ville d'Isaktcha et à 85 kilomètres de la Mer Noire, endroit où le fleuve se sépare en deux bras, celui de Kilia, au nord, qui débite les $\frac{63}{100}$ du volume total et celui de Toulcha au sud, qui emporte les $\frac{37}{100}$ restant. La branche de Toulcha se sépare elle-même en deux autres : celles de Saint-Georges au sud et de Sulina, la plus petite, au nord. L'ingénieur de la Commission Européenne chargé de l'amélioration de la navigation du Danube, sir Charles Hartley, avait à choisir l'un des trois émissaires pour l'exécution des travaux. Après avoir

rejeté le bras de Kilia, dont le chenal était le meilleur, mais dont l'embouchure, composée de douze rameaux à faible tirant d'eau, se trouvait loin des grandes profondeurs de la mer et déterminait un accroissement rapide de son delta, il donna la préférence au bras de Saint-Georges. Les raisons qui le déterminaient étaient la proximité du Bosphore et les grandes profondeurs existant en face de l'embouchure, condition des plus importantes au maintien des résultats.

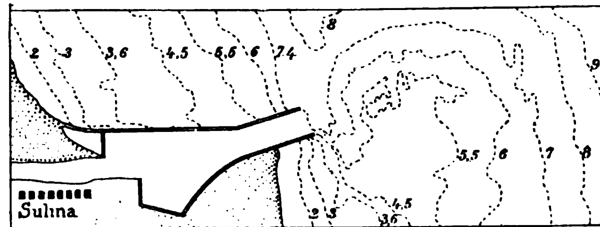


Fig. 303. — Bouche de Sulina.

Mais la Commission Européenne imposa le choix du bras de Sulina, le seul alors navigable bien qu'on n'y sondât que 2 à 3,50 *m* sur la barre et dont toute amélioration profitait immédiatement aux navires. L'ingénieur résolut d'établir des travaux provisoires, pour juger de leur effet, et construisit deux môles en prolongement des rives du bras de Sulina, l'un au nord long de 1 625 mètres, l'autre au sud mesurant 1 055 mètres. Enracinés à terre à une distance de 800 mètres l'un de l'autre, ils vont en convergeant et finissent presque parallèles, séparés par un chenal de 180 mètres ; ils dépassent la barre et vont se terminer dans les fonds de 5,50 *m*.

Les travaux étaient achevés depuis deux ans à peine qu'un chenal de 150 mètres de largeur sur 5 mètres de profondeur s'était spontanément creusé sous l'influence des crues. Mais durant la saison sèche les vents du SO réduisaient la profondeur à 4,60 *m* sur une largeur de 40 mètres environ. La jetée du sud a été alors allongée de 140 mètres, et le chenal s'est depuis maintenu avec 6 mètres de tirant d'eau. L'accroissement annuel du delta de Sulina a été diminué de moitié, les sables rejetés dans les grandes profondeurs ne revenant plus en totalité sur le littoral.

Mississipi. — Le grand fleuve débouche dans le golfe du Mexique par trois bras dont les deux extrêmes débitent chacun 45 % du volume

charrié et le troisième les 10 % restant. Le débit total varie de 6 000 à 35 000 mètres cubes et la proportion des matières solides est plus grande à l'étiage, de sorte que la barre se rapprochait de terre durant la saison sèche.

On avait, dans de mauvaises conditions et vainement, essayé le dragage et même un endiguement à la branche du SO quand Eads demanda l'autorisation d'améliorer l'une des passes principales, offrant de n'être payé qu'après le succès. Après de longues discussions, il obtint d'appliquer ses procédés à la plus petite branche, celle du sud, les autres étant refusées de peur de voir leur situation empirée.

Cette petite branche avait alors environ 200 mètres de largeur sur 20 kilomètres de longueur; la profondeur y atteignait 7,60 *m* sauf à l'entrée où il n'y avait que 4,50 *m* d'eau. Sur la barre extérieure on ne sondait que 2,50 *m*.

Les rives du bras furent prolongées par deux jetées parallèles sur une longueur de 3 600 mètres; elles dépassaient la barre et atteignaient les profondeurs de 10 mètres. Eads calculait que l'allongement du delta étant de 40 mètres par an, il faudrait $\frac{3600}{40} = 90$ ans pour que les musoirs fussent atteints; au surplus, il comptait sur les courants qui existaient au débouché projeté.

Les jetées sont écartées de 210 mètres et se composent de matelas de fascines recouvertes d'enrochements et même, à l'extrémité, sur un kilomètre et demi à la jetée de l'ouest et moitié moins à l'autre, de blocs de béton dont quelques-uns pèsent jusqu'à 250 tonnes. Elles sont presque imperméables; le courant a été ainsi concentré dans le chenal et a pu emporter presque toutes les matières du dépôt, le dragage n'étant intervenu que dans la proportion de 1 % aux parties où l'on rencontrait de l'argile compacte.

Les jetées sont insubmersibles; elles ont produit un chenal dont la profondeur atteint 9 mètres au centre et est de 8 mètres sur 600 mètres de largeur, condition imposée à Eads pour le paiement des annuités d'entretien. Elle est même arrivée à 10 mètres en certains points.

Mais en dehors des jetées, les diminutions de profondeur auxquelles on devait s'attendre se sont produites. D'après les récents sondages comparatifs, le fond jusqu'à la courbe de 30 mètres aurait perdu cinq mètres de profondeur en moyenne, et les principales modifications se sont opérées pendant les dernières années. Nul doute que les dépôts ne

soient une des principales causes de l'atterrissement, mais il y en a deux autres, d'après M. Corthell qui a bien voulu nous donner les renseignements à ce sujet. La première est le changement du plan de comparaison des marées, qui a varié de plus de 30 *cm* et que l'on doit attribuer très probablement à l'immersion de la côte à l'embouchure du Mississipi. L'autre, et la principale, est la production d'une crevasse large et très profonde dans les berges de la Passe à Loutre. Il en est résulté un violent courant dans cette direction, et la passe améliorée a perdu près du tiers de son débit.

La réparation de cette avarie s'imposait donc.

A la fin de 1896 la largeur de la crevasse atteignait 680 mètres ; on en prévit la fermeture par un barrage formé d'une double rangée de pieux entretoisés, avec matelas de fascines lestées afin d'empêcher l'affouillement. Ce travail a été commencé à la fin de 1897 et n'a été terminé que récemment après de nombreuses péripéties. Les sondages complets n'ont pas été publiés depuis cet achèvement ; mais déjà ceux de 1898 avaient donné une amélioration sensible dans la situation en mer.

Le Congrès des Etats-Unis a ordonné les études nécessaires pour la construction à la Passe sud-ouest d'une nouvelle entrée de 10,65 *m* de profondeur et d'une largeur appropriée. La longueur des jetées dépasserait 6 kilomètres. Les études sont en voie d'exécution.

Tampico (fig. 304). — Tampico est situé à l'embouchure de la rivière Panuco, dans le golfe du Mexique. Cette rivière draine un bassin de 90 000 kilomètres carrés, sur lequel la chute annuelle de pluie est de plus d'un mètre ; à des périodes de sécheresse succèdent des crues considérables et le débit du fleuve atteint alors 4 000 mètres cubes par seconde.

A son débouché dans la mer, la marée n'est en général que de 40 *cm* ; mais elle atteint 75 *cm* assez souvent pour que son effet sur le maintien des profondeurs dans le lit soit sensible. A l'étiage, l'eau est très claire ; les crues la chargent d'alluvions très fines dans le rapport de $\frac{1}{1300}$ en volume.

Les vents dominants en hiver, époque des sécheresses, viennent du nord et du nord-est ; il en résulte des vagues qui portent vers le sud. Pendant les mois d'été, ce sont les alizés du sud-est qui dominent, mais

toujours modérés. Le Gulf-Stream enfin détermine vers la terre un contre-courant qui porte à l'ouest.

Malgré l'énorme disproportion entre l'amplitude de la marée et le débit du fleuve, il ne s'est pas formé de delta; mais il existait une barre de sable où l'on ne sondait que 3 à 4 mètres d'eau et sur laquelle le courant s'étendait en éventail. Pour améliorer cette situation, on a construit deux jetées parallèles, dans la direction est-nord-est, longues de 2 040 mètres, distantes de 300 mètres et s'étendant jusqu'aux fonds de

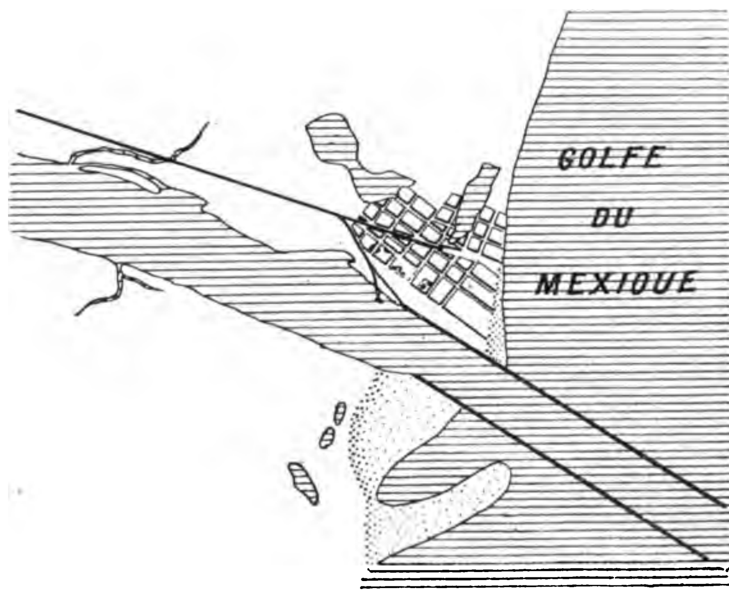


Fig. 304.— Embouchure du Panuco.

7,50 *m*. Tout d'abord, avant que le chenal eût eu le temps de se creuser, le lit limité par les jetées ne suffisait pas à l'écoulement des crues, et il en résulta un surélèvement des eaux dans la rivière, qui atteignit 60 *cm*. Mais six mois après l'achèvement des jetées, en juillet 1893, une crue anormale par sa durée de vingt-deux jours balaya entièrement la barre comprise entre les jetées (un volume de plus de 700 000 mètres cubes) et l'on y sonda ensuite 8,25 *m*. Cette crue était telle que la vitesse du courant dans le chenal était de 4 mètres à la seconde et qu'un navire filant 12 nœuds ne pouvait y pénétrer.

L'état de choses s'est parfaitement maintenu; il existe maintenant un chenal de 7,60 *m* de profondeur minima, admettant tous les navires qui trafiquent dans le golfe du Mexique.

De chaque côté des jetées le rivage s'est avancé, mais il faudra encore bien des années avant que l'entrée soit menacée d'atterrissement.

L'ingénieur de ce travail si réussi, ainsi que du suivant, est M. Corthell qui nous a donné l'état récent des travaux.

Brazos. — Le même procédé d'endiguement par des jetées parallèles distantes de 167 mètres a été appliqué à l'embouchure de la rivière Brazos au Texas, entre Tampico et le Mississipi. Cette rivière dont le débit, réduit à 50 mètres cubes à l'étiage, atteint 1 600 mètres cubes durant les crues, charrie alors des proportions énormes de sédiments $\left(\frac{1}{400}\right)$. Il n'y avait, à l'endroit où a été établi le chenal, qu'une hauteur d'eau de 30 à 40 *cm*; avant même l'achèvement des travaux, des navires calant 4,80 *m* pouvaient remonter jusqu'à 6 kilomètres en amont, et l'on espère atteindre un mouillage supérieur à 6 mètres.

Sabine Pass (fig. 305). — Le tirant d'eau sur la barre de Sabine Pass (Texas), dans le golfe du Mexique, était de 1,80 *m* et l'on avait vainement tenté de l'augmenter par le dragage.

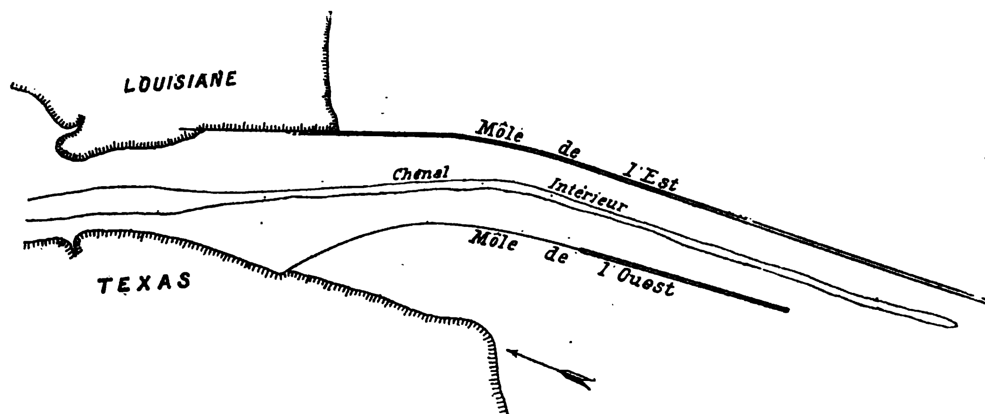


Fig. 305. — Embouchure de Sabine Pass.

On construisit alors deux jetées élevées de 60 *cm* au-dessus des hautes eaux, courbes et presque concentriques. Celle de l'est a une longueur de 5 210 mètres, celle de l'ouest de 4 540 mètres. On dut draguer entre les jetées 270 000 mètres cubes et l'on obtint ainsi un chenal de 30 mètres de largeur avec 4,90 *m* d'eau ; la profondeur de

5 mètres en dehors des jetées se maintient sans aucun ensablement. On espère atteindre des résultats plus complets en prolongeant la jetée de l'est.

Rhône. — Le Rhône se jette dans la Méditerranée par deux bras dont l'un, appelé Grand Rhône, a devant Arles 14 mètres de profondeur ; son débit varie de 500 à 8000 mètres cubes ; dans les crues ses eaux contiennent $\frac{1}{2000}$ de matières solides, dont la majeure partie est du sable roulé sur le fond.

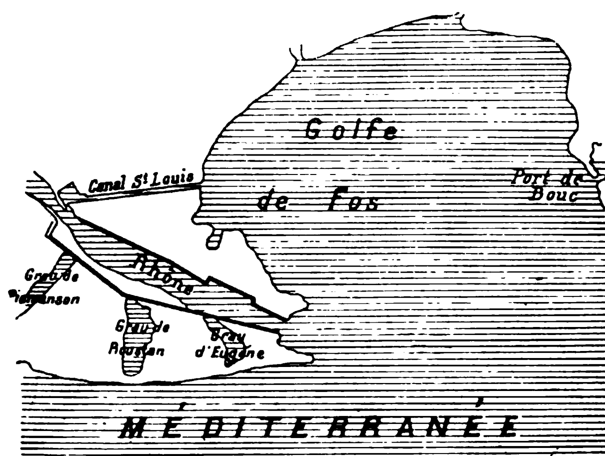


Fig. 306. — Embouchure du Rhône.

Avant 1852, il débouchait à la mer par quatre bras ou *graus* : ceux de Piémanson, Roustan et Eugène sur la rive droite, et enfin le bras principal, encombré alors de nombreux îlots de sable ou *theys*, surtout sur la rive gauche. Son embouchure était obstruée par une barre presque à fleur d'eau, sur laquelle se déplaçait une passe dont la profondeur moyenne était de 1,85 *m* (fig. 306).

De 1852 à 1856, le fleuve fut endigué par le barrage de tous les graus secondaires et la construction le long du bras principal conservé de deux levées terminées en mer par des portions longues de 350 mètres parallèles et espacées de 400 mètres. Leur extrémité s'arrête à 600 mètres en deçà de la position occupée par la barre avant le commencement des travaux ; mais celle-ci s'était reculée, et se trouvait à la fin à 1 kilomètre des musoirs. La portion ultime du chenal avait la direction S E et débouchait dans le golfe de Fos.

Par la concentration de toutes les eaux dans un seul chenal, la puis-

sance du fleuve avait été augmentée ; aussi y eut-il d'abord une amélioration sensible dans la passe qui accusa jusqu'à 4,20 *m* de profondeur après une crue. Mais tous les apports du fleuve avaient également pris la route tracée et en se déposant peu à peu, ils ont reconstitué la barre à la même hauteur (fig. 307).

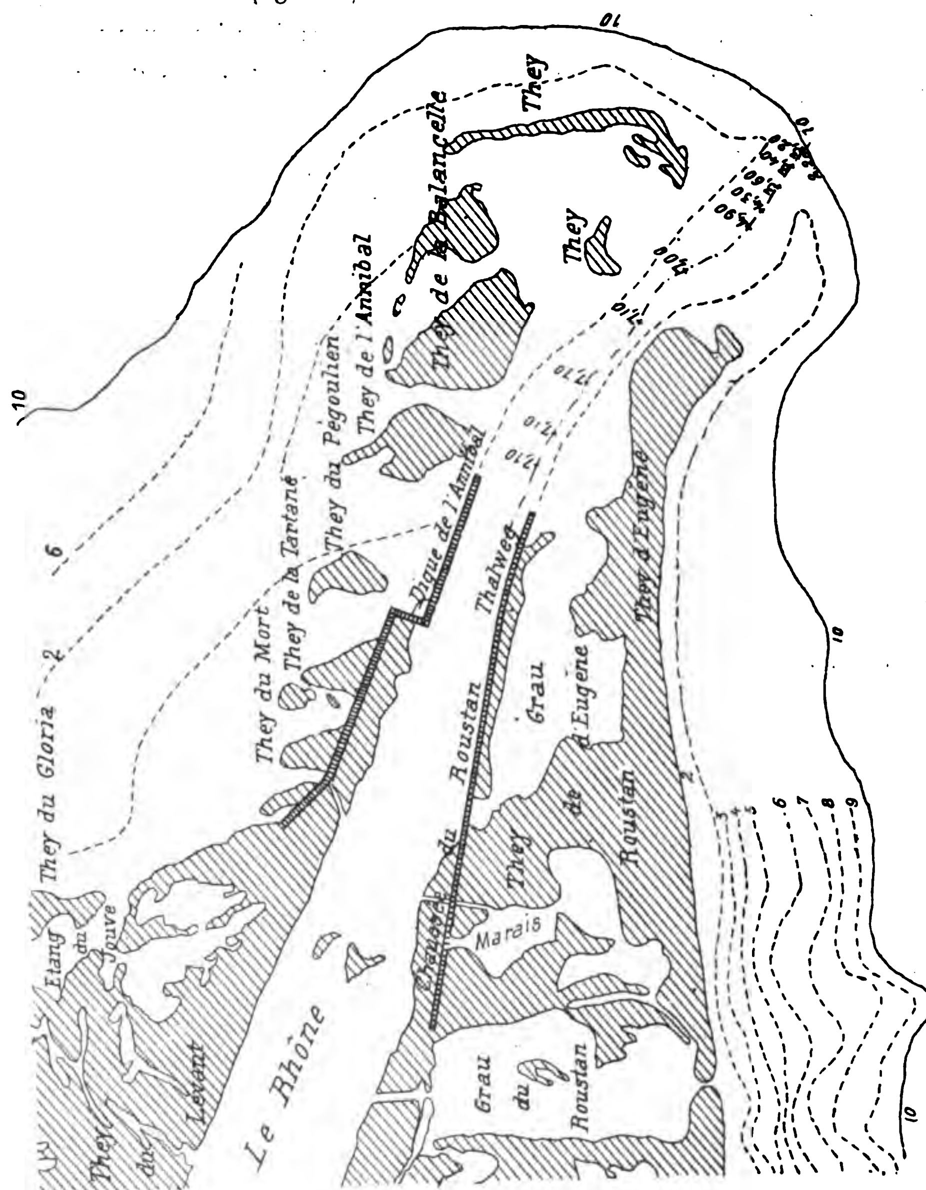


Fig. 307. — Embouchure du Rhône.

L'insuccès de ces travaux pouvait facilement être prévu. Au Danube, au Mississipi, les jetées protectrices du chenal ont été portées au delà de la barre, qui a pu être enlevée ; mais comment espérer que le courant du Rhône irait à 600 mètres affouiller le cordon sablonneux? Il devait divaguer de côté et d'autre ; s'il a pu pourtant produire d'abord une amélioration, elle devait être momentanée.

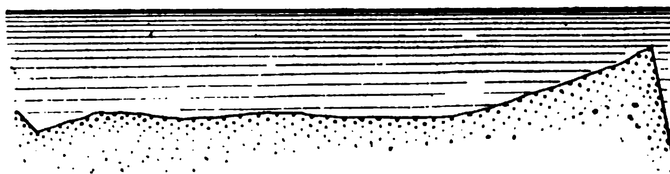


Fig. 307. — Barre du Rhône en 1873.

Deux autres conditions condamnaient à l'avance la tentative. Sur cette côte, abstraction faite des vents de terre, c'est celui de SE qui est dominant; or il enfilait directement le chenal où il refoulait les déblais. Enfin, l'embouchure se faisait dans le golfe de Fos où les alluvions trouvant une eau tranquille se déposaient.

Il fallait, pour se mettre dans les meilleures conditions, tenter l'amélioration du grau de Roustan, en le raccordant par une courbe à grand rayon avec le fleuve, l'enserrer entre deux jetées parallèles, rapidement construites et prolongées au delà de la barre.

Le courant en arrivant au musoir aurait été pris en travers par le vent de SE et rejeté à l'ouest avec les alluvions. Celles-ci au contact de l'eau salée se seraient déposées, mais la situation même de la barre actuelle prouve que le dépôt se serait effectué à une certaine distance. Comme ce n'eût pas été devant le chenal, l'amélioration aurait duré plus de temps à coup sûr qu'en face du bras principal.

Mais il ne semble pas que même dans ces conditions le succès eût été définitivement assuré; le sable du Rhône est lourd et demanderait pour être entraîné des vitesses qu'on ne peut guère espérer. Il est plus que probable que les fonds se fussent relevés et qu'il aurait fallu prolonger les jetées.

Après combien de temps? C'est la question intéressante et peut-être la résoudrait-on en partie par l'étude des conditions locales.

En 1892, pour diminuer le volume des apports qui se rendent à la barre, le grau de Roustan a été réouvert jusqu'à la cote — 4 mètres ; un

chenal de 20 mètres de largeur et d'un mètre de profondeur a été creusé entre le Rhône et l'étang de Roustan; le cordon de sable qui séparait l'étang de la mer a été coupé. Le chenal de 20 mètres s'est élargi et approfondi, mais il n'y a guère eu d'amélioration entre la mer et l'étang. Pour obtenir un résultat il faudrait un travail complet et rapidement exécuté; la question a d'ailleurs moins d'importance depuis la création du canal Saint-Louis.

On a proposé aussi de tourner à l'ouest le chenal du bras principal en le continuant par deux jetées courbes ; mais on n'obtiendrait probablement ainsi aucun résultat.

Conclusions. — Ainsi qu'on l'a vu, le principal procédé employé pour l'amélioration des barres produites par les apports fluviaux dans les mers à niveau invariable ou à faible marée, a consisté dans la prolongation du lit du fleuve par deux jetées qui s'avancent au loin. On n'a pu obtenir de résultat favorable qu'en portant le débouché au delà de l'emplacement de la barre. Il importe également qu'on puisse ainsi atteindre les grands fonds. Un fleuve comme le Volga, qui se jette dans une mer sans profondeur où il apporte un volume énorme de sédiments, présente d'immenses difficultés à toute tentative de ce genre et ne pourrait peut-être, dans l'état actuel de la science, être amélioré que par le dragage.

En Amérique, les jetées ont été établies parallèles et rectilignes ; au Danube, les murs de protection sont convergents, sauf à leur extrémité. Les jetées rectilignes guident bien le courant tout le long du chenal, où les apports dès lors n'ont nulle part de tendance à se déposer ; mais elles présentent l inconvénient de conserver aux vagues qui y entrent toute leur hauteur.

Les jetées doivent être pleines, dépasser le niveau de la mer, pour empêcher la pénétration du sable et guider le courant, ne pas présenter de courbes. Au Mississipi où elles s'infléchissent légèrement, on a éprouvé de la difficulté à maintenir le chenal. Il importe de les exécuter très rapidement afin que la barre ne se déplace pas devant le débouché à mesure de leur allongement.

Le choix du bras à corriger est très important. Au Mississipi et au Danube, c'est le plus petit qui a été amélioré et le succès a fait conclure qu'il fallait toujours choisir la passe la plus restreinte, d'autant qu'au Rhône l'endiguement qui n'a pas réussi avait été exécuté au

bras principal, renforcé par la fermeture des autres graus. Il ne faut pas oublier que sir Ch. Hartley n'avait pas choisi la passe de Sulina, pas plus qu'Eads la South Pass; elles leur ont été imposées, et il n'est pas prouvé qu'ils n'eussent pas aussi bien réussi dans celles qu'ils voulaient corriger.

On se décidera surtout par les conditions locales, qui au Rhône par exemple étaient toutes en faveur du grau de Roustan. Néanmoins, il est certain qu'il n'y a pas intérêt en général à s'attaquer aux grands bras qui charrient la majeure partie des alluvions, et à plus forte raison à barrer les autres.

Il y a lieu de choisir celui où le delta s'avance le moins, où les courants sont le plus prononcés, que les vents dominants frapperont de travers, où les grands fonds de la mer seront le plus voisins de l'embouchure, etc. Toutes ces conditions, certes, ne seront pas réunies en faveur de l'une des branches; on choisira les plus importantes. Il est clair, par exemple, que si l'on pouvait atteindre les grands fonds à l'extrémité des jetées devant l'une des embouchures, cette condition seule vaudrait mieux que toutes les autres.

Le volume des matières charriées, leur poids spécifique seront des facteurs importants. Le Rhône les roule sur le fond et ne les entraîne pas aussi loin que le Danube, où elles sont en suspension. La densité de l'eau de mer est aussi à considérer; plus l'eau est chargée de matières salines, plus vite s'effectuent les dépôts. Dans la mer Noire, de faible densité, les apports de la branche de Sulina se séparent plus difficilement du courant qu'au Rhône et au Mississipi; aussi a-t-on vu que la situation y est bien meilleure. En revanche, le talus $\left(\frac{1}{264}\right)$ y est quatre fois moins prononcé que devant le grand fleuve américain $\left(\frac{1}{66}\right)$ condition qui a été un avantage pour celui-ci.

Et enfin, quand on a réussi à créer un chenal navigable, il est à peu certain, sauf des cas tout à fait exceptionnels, que le fond de la mer se relèvera peu à peu en face, et qu'il faudra recourir à un allongement des jetées. Mais si les dépenses du premier travail ont été compensées par les bénéfices réalisés, le succès n'en est pas moins complet: les œuvres humaines ont une durée limitée.

BAIES FERMÉES

Dans certains estuaires très étendus ne débouchent que de faibles ruisseaux et le volume d'eau pure qui s'ajoute au jusant est insignifiant comme à Yaquina Bay. Enfin, des baies fermées ne reçoivent aucun cours d'eau. On peut cependant, dans certaines conditions, leur appliquer les mêmes procédés d'amélioration, c'est-à-dire rétrécir leur entrée par des môles de façon à déterminer devant la passe une chasse énergique. Il en résulte que si pendant le flot il pénètre des alluvions, elles se déposent en eau tranquille où elles sont facilement draguées; au jusant, la chasse emporte une partie au moins des dépôts et creuse un chenal où la vitesse accrue rend de plus en plus difficile l'accès des apports. Si ceux-ci ne sont pas trop considérables, si la direction des vagues, celle des môles, les circonstances générales enfin sont favorables, le courant arrive à déblayer en partie le bassin que les dragages achèvent de creuser.

Un certain nombre de baies dont voici les principales ont été ainsi améliorées.

Otago (fig. 308). — Le port d'Otago, sur la côte du sud-est de la Nouvelle-Zélande, est placé dans un bras de mer dont la superficie est de 50 kilomètres carrés; la marée y monte de 1,40 *m* à 2 mètres et même parfois 2,50 *m*.

La résultante générale de la direction des vents vient du sud-ouest pendant 58 jours; mais c'est là un vent de terre avec peu d'action sur les vagues; celles-ci contournent le cap Taiaroa et se présentent dans la direction du sud-est devant l'entrée de la baie, qui est inclinée vers le nord-est; aussi ont-elles poussé dans cette dernière direction les sables qui ont formé une barre provenant bien entendu exclusivement de l'océan.

Le projet d'amélioration consistait à fermer l'entrée au nord par une jetée longue de 1 900 mètres, atteignant les fonds de 8,50 *m* et à prolonger la rive intérieure du cap Taiaroa par une courte jetée de 520 mètres, légèrement convergente vers la première et laissant entre elles une ouverture de 460 mètres. Les vagues qui se présentent du sud-est devaient ainsi passer presque tangentiellement devant les musoirs.

Faute de ressources la petite jetée n'a pu être construite et celle du nord a été arrêtée en face du cap Taiaroa, dans les fonds de 5,50 *m*;

néanmoins, l'idée générale est ainsi conservée, dans de plus mauvaises conditions seulement.

Le dragage s'opérait en même temps. De la barre il a été enlevé **83 000** mètres cubes en 5 ans et demi; durant le même laps l'intérieur de la baie était débarrassé de **600 000** mètres cubes.



Fig. 308. — Baie d'Otago.

En avril **1891**, la barre présentait **7,75** *m* de tirant d'eau au lieu de 5 mètres; la chasse par le courant seul a donc enlevé là certainement plus de **300 000** mètres cubes. La crête de la barre s'est déplacée vers la mer.

Cependant il existe dans le chenal deux passes distinctes, creusées l'une par le flot, l'autre par le jusant, ce qui prouve que les améliorations obtenues ne sont pas encore complètes; il est probable qu'elles ne le seront qu'avec l'exécution du projet total, sans doute même avec quelques modifications indiquées par l'expérience.

Charleston (fig. 309). — Le port de Charleston, Caroline du Sud, est situé sur l'Océan Atlantique, dans une baie dont la surface mouillée est de **40** kilomètres carrés. La marée y est inférieure à **2** mètres. A l'entrée existait une barre traversée par quatre chenaux, dont le plus

profond n'avait que 3,60 *m* d'eau. On s'est proposé d'établir et de maintenir, par le moyen de deux môles, un chenal d'une profondeur minima de 6,40 *m* avec l'aide du dragage.

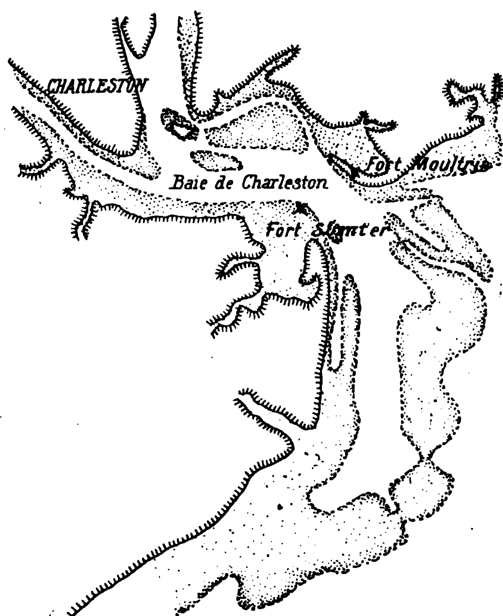


Fig. 309. — Baie de Charleston.

Le môle sud part de l'île Morris, il a 5 650 mètres de longueur; celui du nord, qui a 4 500 mètres, a son origine dans l'île Sullivan; ils sont écartés de 4 000 mètres à leur racine, et l'entrée a 850 mètres (fig. 310). Les deux môles convergent donc l'un vers l'autre mais leur convexité est tournée du côté du chenal; celui du sud dé-

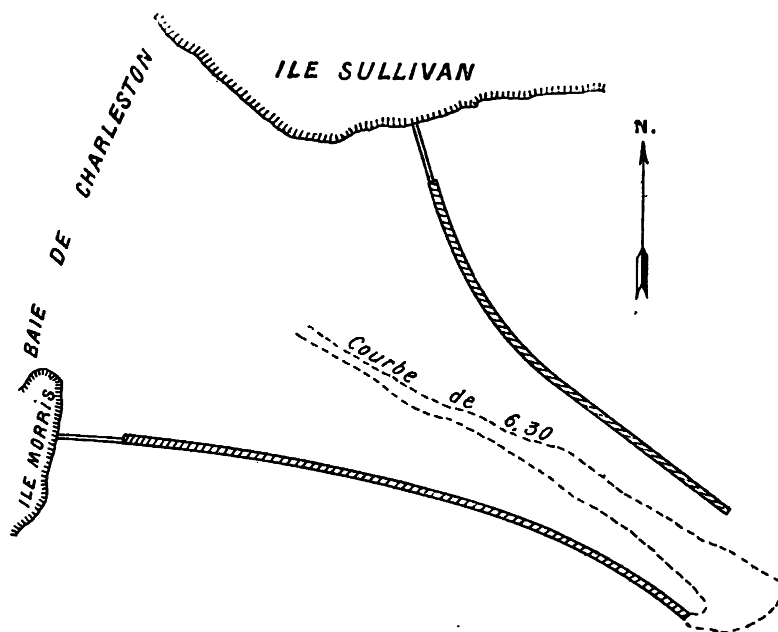


Fig. 310. — Môles de Charleston.

borde d'environ 360 mètres. Les musoirs ont été arrêtés dans les fonds de 5,50 *m* et le chenal a des profondeurs de 5,20 *m*; mais il a fallu y opérer des dragages considérables. Dans la seule année 1894, 820000 mètres cubes en sont sortis, dont 456000 par l'action des chasses et 364 000 par le dragage.

Galveston (fig. 311). — La baie de Galveston (Texas) dans le Golfe du Mexique, présente une superficie de 1200 kilomètres carrés dont une grande partie est profonde de plus de 9 mètres. Elle communique avec la mer par un goulet large de plus de 2 kilomètres et demi. En dedans du goulet se trouvait une barre avec 4 mètres d'eau. A l'extérieur, à une distance de 5 kilomètres, existait un autre cordon sur lequel on ne sondait que 3,60 *m*.

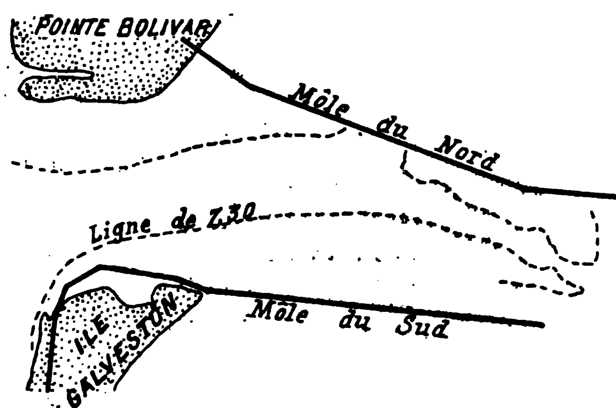


Fig. 311. — Môles de Galveston.

Les travaux d'amélioration, commencés en 1874, furent deux fois modifiés en 1880 et 1886. Le plan exécuté consiste en deux môles partant l'un de Bolivar Point, l'autre de l'île Galveston. Ils sont en enrochements et s'élèvent de 1,50 *m* au-dessus des basses mers; la marée ne dépasse guère un mètre. Ils devaient s'arrêter par les fonds de 9 mètres avec un écartement de 2 135 mètres entre les musoirs; mais cette distance a été légèrement augmentée par le changement de direction du môle nord sur le dernier kilomètre.

Les môles ont été terminés en 1897 et 1898. Le premier, celui du sud, a 10 860 mètres de longueur, y compris une partie intérieure à la baie, l'autre a 7 900 mètres.

Grâce à un énergique dragage (450 000 mètres cubes ont été extraits en 1898) on a obtenu un chenal de 7,75 *m* de profondeur.

La dépense totale a été de 40 millions.

Le mouvement commercial du port est de 3 millions de tonnes.

Wilmington. — Le port de Wilmington est une crique découpée dans la baie de San Pedro, sur la côte de Californie. La superficie recouverte par les eaux de marée est de 560 hectares, et l'amplitude est de 1,20 *m*, ce qui donne un débit de jusant de 170 mètres cubes à la seconde. A l'entrée existait une barre avec au plus 60 *cm* d'eau.

Pour améliorer l'embouchure, on l'a continuée à l'est par un môle long de 2040 mètres; un autre a été établi à l'ouest, d'abord convergent vers le premier auquel il devient ensuite parallèle et qu'il finit par dépasser. L'entrée se trouve par les fonds de 5,50 *m* et sur la barre il y a maintenant plus de 4,50 *m* d'eau.

Les travaux exécutés seront compris dans l'enceinte du port de refuge qui va être établi dans la baie de San-Pedro.

Aransas Pass. — C'est le débouché dans le golfe du Mexique de la baie d'Aransas, dont la superficie de 200 kilomètres carrés s'augmente de celle des baies de Corpus Christi, Mesquite, Saint-Charles et Copano avec lesquelles elle est reliée; la surface totale atteint 900 kilomètres carrés. La mer y marne de 30 *cm* environ.

Un cordon de sable, entassé par les vagues et les courants littoraux dus aux vents, s'étend tout le long de cette côte du Texas, créant des lagunes communiquant avec la mer par des passes que ne réussit pas à creuser le courant de la marée. Parfois pourtant de forts vents du sud-est élèvent le niveau des lagunes d'un mètre et plus, et le vent du nord, quand il revient, repousse à l'extérieur cette masse d'eau, dont la violence malheureusement s'use à détruire les rives du chenal.

La passe d'Aransas, située entre les îles Saint-Joseph et Mustang, se déplaçait vers le sud à raison de 8 mètres environ par an; elle a été fixée en 1889 par des travaux de défense consistant en épis, d'ailleurs fréquemment détruits par la mer.

De 1881 à 1885 fut construit sur le côté sud de l'entrée un môle composé de fascinages lestés de 1 200 mètres de longueur. Celle-ci se divisait en deux parties : l'une rectiligne, partant de l'île Mustang, de 720 mètres, continuée par une courbe de 480 mètres de développement ; la hauteur était d'un mètre au-dessus moyen de la mer.

En 1888, le rapport officiel des Ingénieurs de l'État disait : « La courbe donnée au môle avait pour but d'utiliser la force centrifuge

des courants, et l'on espérait qu'un seul môle suffirait à creuser le chenal à la profondeur désirée de 3,60 *m*. Cette forme est sujette aux critiques suivantes :

« 1° Son action est incertaine et irrégulière. Le môle est établi au milieu d'un nombre inconnu de millions de mètres cubes d'eau animés de vitesses variant de 15 *cm* à plus de 2 mètres par seconde. Quelle courbure doit-il avoir pour creuser le chenal sans être lui-même affouillé? Si la courbure est adaptée à une vitesse donnée, elle ne le sera pas à une autre. Un affouillement excessif alternera avec de faibles courants qui ne suivront aucune loi pendant les marées moyennes;

« 2° Elle est coûteuse et d'un entretien difficile;

« 3° Elle se prête mal à de futures extensions. Continué dans le même sens sur 600 mètres, le môle deviendrait parallèle au rivage;

« 4° Si un deuxième môle est jugé plus tard utile, il sera difficilement placé. »

Le rapport, en définitive, proposait d'abandonner la direction curviligne, de diriger le môle vers les grandes profondeurs en ligne droite, et de construire sur la rive nord un second môle parallèle au premier à la distance de 600 mètres. On espérait ainsi obtenir une profondeur de 6 mètres.

Un des ingénieurs de la Commission chargée de l'examen des propositions précédentes concluait à l'inutilité de la seconde jetée.

Pendant ce temps un ingénieur distingué, professeur de l'Université de Philadelphie, M. Haupt, proposait vainement d'essayer à Aransas un môle établi suivant ses idées personnelles; le Gouvernement en 1888 abandonnait toute tentative d'amélioration de la passe.

Une Compagnie intéressée à une industrie établie dans la baie demanda alors et obtint l'autorisation de réaliser à son compte le projet abandonné et elle en confia l'exécution à MM Haupt et Ripley.

Dans un grand nombre de brochures intéressantes, M. Haupt a développé l'exposé de ses opinions. Nous ne pouvons que les condenser en quelques lignes.

Pour lui, ce n'est pas la vitesse du courant qui creuse un chenal; la preuve, c'est qu'elle est parfois très considérable dans des cours d'eau ou sur des côtes dont le fond n'est pourtant pas attaqué. L'action affouillante est due exclusivement à la réaction des filets liquides contre le fond, et le meilleur mode de déterminer la réaction, c'est la force centrifuge.

En principe donc, on doit guider le courant par une ligne concave et le maximum d'effet s'obtient par une courbe en S, qui concentre le mieux les filets liquides.

Un seul ouvrage de protection est utile ; il doit être placé au vent de la passe, à la fois pour arrêter les alluvions, qui viennent de ce côté, et pour abriter les navires des vagues.

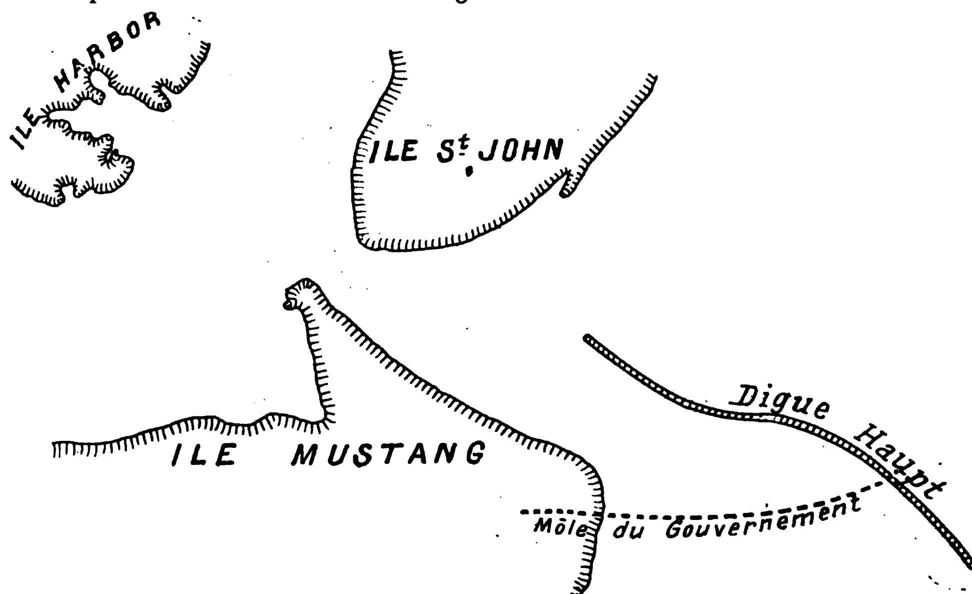


Fig. 313. — Baie d'Aransas.

Le mur en S doit encore être situé sur la barre elle-même ou la partie à creuser, car la réaction se détermine le long de la courbe.

Le double môle ordinaire a l'inconvénient de diminuer le volume du prisme de marée qui pénètre dans la baie ou l'estuaire en correction. Même un ouvrage unique interrompt l'afflux du flot s'il tient à la terre ; l'ouvrage de protection sera donc une digue en S.

L'expérience de l'ingénieur, les études préliminaires indiqueront sa longueur et la distance qui la séparera du rivage, la direction qu'elle occupera dans le prolongement de la rive au vent afin que le courant de jusant aille directement se coller contre la courbe et y déterminer la réaction. Le mur ne présentera aucun obstacle de nature à gêner l'écoulement.

Telle est en résumé, débarrassée de considérations assez obscures et parfois à notre avis erronées sur le rôle du flot, la doctrine de

M. Haupt; la forme de sa digue est d'ailleurs variable selon les cas et affecte souvent des apparences difficiles à comprendre. Quoiqu'il en soit, la figure 313 *bis* indique la disposition adoptée à Aransas Bay: la digue laisse entre elle et la terre une distance de 500 mètres.

L'ouvrage a été terminé en 1895; et tandis qu'en 1897 un rapport officiel affirmait l'insuccès complet de l'expérience, M. Haupt en 1899 a donné le plan de sondages représenté par la figure 313 et qui prouve que l'approfondissement a atteint 5,50 *m*, bien que la digue fût restée inachevée et que l'ancien ouvrage du Gouvernement qui croisait la passe et qu'il a fallu enlever, n'eût pas entièrement disparu. Le Chef des Ingénieurs du Gouvernement a d'ailleurs confirmé ce résultat.

En pareille matière, une réussite n'est pas absolument probante; mais comme d'autre part il y a évidemment une partie très juste dans la théorie de M. Haupt, nous avons tenu à l'exposer à propos de ce premier succès.

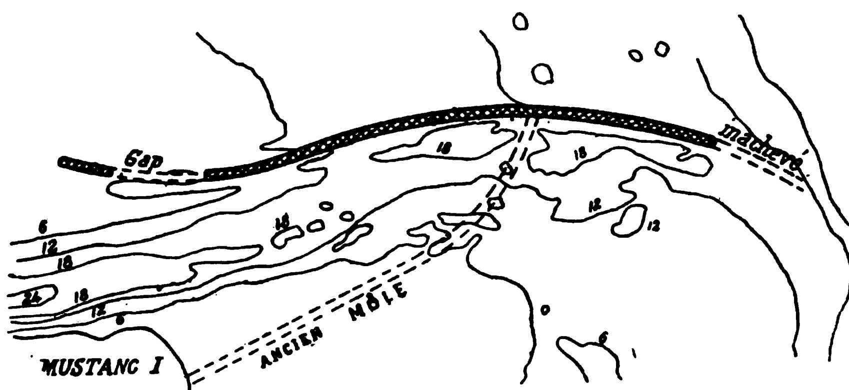


Fig. 313 *bis*. — Aransas-Pass. — Détails du môle Haupt.

La figure 314 indique, d'après un plan qu'a bien voulu nous fournir M. Haupt, l'état probable définitif des lieux (¹). Les courbes de niveau sont dessinées collées contre la partie concave de l'S que forme la digue; il ne semble pas que la portion convexe ait une influence sur leur situation et sa suppression n'aurait donc probablement pas empêché le succès, que l'auteur cependant attribue uniquement à la forme en S. De même on peut admettre facilement par l'inspection du plan que rien n'eût été changé si la courbe concave avait continué jusqu'à s'enraciner

(1) Cette figure est photographiée d'après un plan en relief figurant à l'Exposition de 1900, à Paris.

à la pointe de l'île Saint-Joseph. De cette façon on se serait mis plus sûrement à l'abri de l'invasion du sable.

Elle ne s'est pas produite à Aransas Bay et le fait peut s'expliquer. Mais obtiendrait-on ailleurs le même résultat? Le doute est permis.

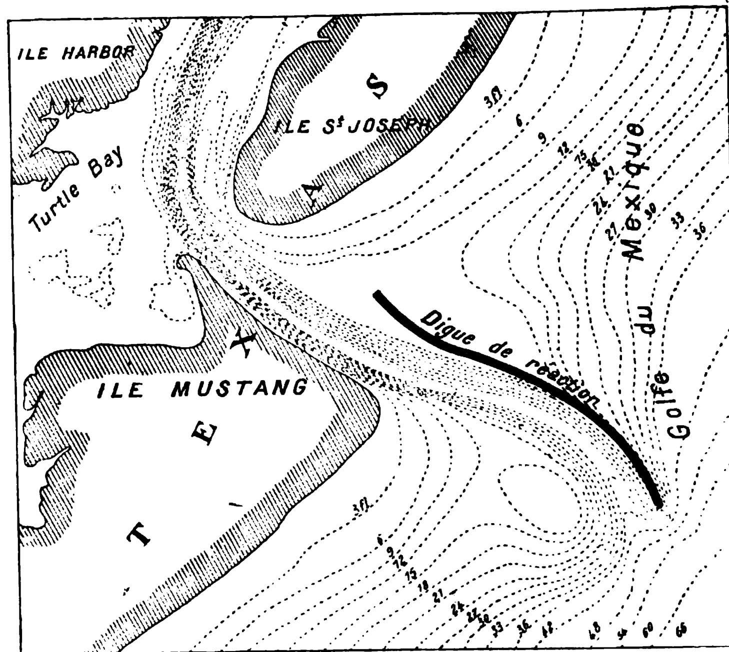


Fig. 314.

Quant à la nécessité de l'ouverture entre la digue et la terre pour assurer le remplissage de la baie par la marée, elle n'est pas bien établie. La section entre les îles Saint-Joseph et Mustang n'est pas plus considérable que celle entre la digue et l'île Mustang et l'alimentation aurait donc été assurée par la dernière.

Ports canaux. — Il existe en Italie une classe de ports, d'importance très minime, bien qu'à eux tous ils effectuent un mouvement de marchandises de 400 000 tonnes ; ils sont établis ou à l'embouchure de petits fleuves ou à l'extrémité de canaux artificiels.

Parmi les premiers on peut citer les ports de Fiumicino, Pesaro et Rimini (fig. 315), sur le Tibre, l'Isaure et la Marecchia. Les seconds sont principalement ceux de Viareggio, Sinigaglia et Ravenne, le plus important de tous.

Leur débouché à la mer s'effectue par deux jetées parallèles, distantes d'une vingtaine de mètres et qui s'avance assez loin pour atteindre la profondeur désirée. Ces jetées sont généralement composées de palissades enrochées.

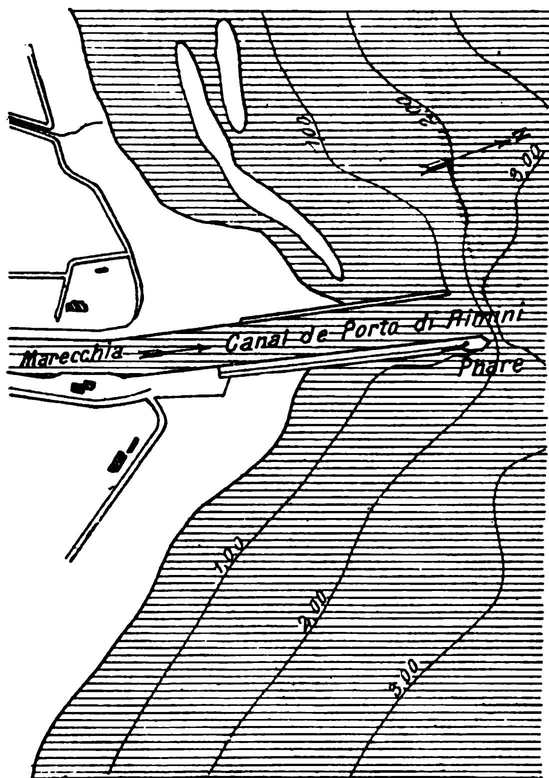


Fig. 315. — Port canal de Rimini.

La majeure partie de ces ports est située sur l'Adriatique, où la marée, plus sensible que dans la Méditerranée, entretient assez bien l'entrée; ainsi à Ravenne, le débouché du canal Corsini atteint 3,50 *m* de profondeur en basse mer et il entre quelques petits vapeurs dans les deux darses creusées à 10 kilomètres du rivage. Ceux de la mer Tyrrhénienne sont beaucoup moins importants; mais leur entrée, si peu profonde qu'elle soit, laisse encore cependant pénétrer de petits voiliers.

EXPÉRIENCES SUR DES MODÈLES

M. le professeur Reynolds d'abord, et surtout l'éminent ingénieur M. Vernon-Harcourt, ont pensé que l'on pouvait étudier dans un modèle en petit les phénomènes qui se passent dans les estuaires soumis en même temps à l action de la marée et du courant de la rivière. Des plâtres reproduisant les caractères principaux des embouchures de la Seine et de la Mersey ont été soumis à de longues expériences. Plus récemment, M. Wheeler les a recommencées et un modèle de la Seine sur une plus grande échelle a été construit à Rouen sous la direction des Ingénieurs des Ponts et Chaussées, qui n'ont pas encore publié le résultat de leurs observations. L'estuaire de la Seine y est figuré sur une longueur de 35 mètres.

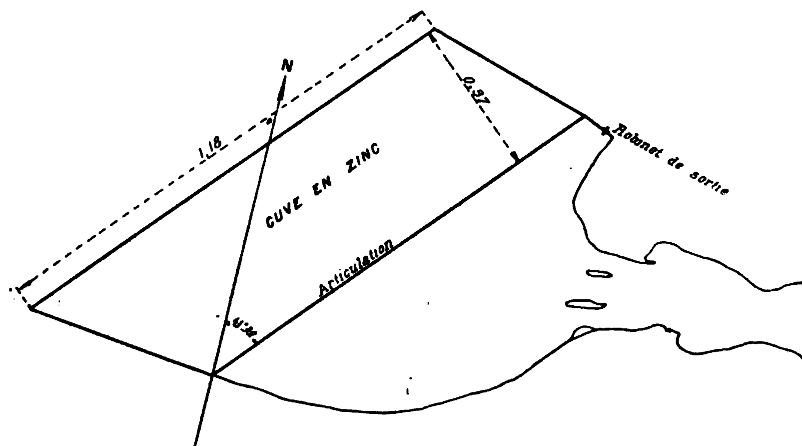


Fig. 316. — Modèle de la Seine.

Les expériences de M. Reynolds avaient été purement théoriques et semblaient seulement prouver que la dimension des modèles n'avait guère d'action sur les résultats. Les résultats les plus approchés de la pratique ont été obtenus par M. Vernon-Harcourt, dont la reproduction de la Seine (fig. 316) était construite à $\frac{1}{40000}$ pour les longueurs et à $\frac{1}{400}$ pour les profondeurs. La longueur totale était d'environ 2,75 *m*.

La hauteur de la marée, qui est de 7,20 à l'embouchure de la Seine, n'était que de 18 millimètres dans le modèle $\left(\frac{1}{400}\right)$.

Le lit de la Seine était moulé en ciment de Portland, qui a d'ailleurs occasionné bien des déboires. A ce moule était attaché un réservoir en zinc destiné à engendrer la marée (générateur) ; le fond et les côtés en étaient réunis à celui du modèle par une bande de caoutchouc, destiné à former charnière étanche. Le générateur mesurait 94 *cm* de longueur sur 36 *cm* de largeur ; une vis appliquée contre l'arête opposée à la charnière permettait de la soulever et de l'abaisser lentement.

On remplissait le générateur d'eau jusqu'à la hauteur des plus basses mers ; et le soulèvement était au maximum justement des 18 millimètres de marée de vive eau.

L'inclinaison de la charnière sur l'axe du lit, supposé est-ouest, était de 50°, de façon que l'onde-marée venait à peu près du nord-ouest, comme dans la réalité.

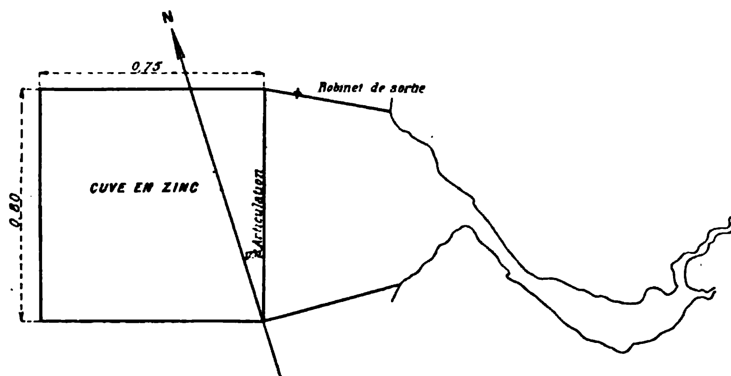


Fig. 317. — Modèle de la Mersey (1).

L'eau représentant le débit de la Seine était versée à l'extrémité d'amont du canal ; la sortie d'une quantité égale était assurée à l'extrémité inférieure par un robinet à plus large orifice, placé au niveau convenable pour l'écoulement de l'eau dans une seconde citerne, de même dimension, pendant la marée haute.

Dans le modèle, on plaçait la quantité voulue de sable pour élever le fond à son niveau moyen ; le générateur étant abaissé, on remplissait d'eau jusqu'au niveau des basses mers, et l'on commençait l'opération. Le choix du sable a été difficile, car il le fallait très fin pour être remué par les faibles courants obtenus.

Chaque marée durait 25 secondes. Au bout d'un certain nombre d'opérations, les chenaux près de Quillebœuf se dessinaient comme ils

(1) Les deux figures sont dues à l'obligeance de M. Vernon-Harcourt.

l'étaient avant la construction des levées ; partout, le modèle reproduisait les conditions antérieures de la Seine (carte de 1834).

On introduisit alors dans le cours d'eau des bandes de fer-blanc, représentant les levées de la Seine, et l'on obtint encore les résultats qui se sont manifestés dans le fleuve.

L'auteur des expériences en a conclu qu'on pouvait se servir de ce mode d'investigation pour se rendre compte des effets probables de la construction de nouveaux ouvrages tant dans l'estuaire de la Seine que dans d'autres embouchures comme celle de la Mersey (fig. 317). Les divers projets conçus en vue de l'amélioration d'un chenal entre Berville et la mer ont été soumis à l'épreuve du modèle. Il est superflu de les exposer, quand les expériences de Rouen, à plus grande échelle et plus prolongées, peuvent les contredire au moins dans certains détails.

C'est le principe qui doit être discuté. Quelque séduisant qu'il soit, avec quelque habileté qu'il ait été appliqué par M. Vernon-Harcourt, on ne peut s'empêcher de remarquer combien les conditions des expériences sont incomplètes.

La marée n'est pas le seul facteur qui agisse sur la disposition d'un estuaire. Loin de là. Le vent, les tempêtes, les crues, les apports nouveaux de sable, de vase, de pierres, exercent également une influence considérable. La nature du fond, des rives est aussi importante.

Même au point de vue de la marée, il est difficile d'en réaliser, surtout dans un estuaire comme celui de la Seine, toutes les circonstances. Dans les expériences de M. Vernon-Harcourt, l'onde était introduite du NO ; c'est bien la direction de la marée principale ; mais il n'a pas été tenu compte de celle qui entre dans la Seine après avoir longé les côtes du Calvados, et qui porte la majeure partie des sédiments. La rencontre de ces diverses ondes est tellement caractéristique que c'est elle qui produit la longue étale devant l'embouchure ; or elle ne peut se manifester, sur ces rivages si plats, sans entraîner des chocs de courants qui ne peuvent être sans répercussion sur les phénomènes de l'estuaire.

L'habile expérimentateur et ceux qui l'ont imité ne se dissimulent pas la valeur de ces objections. Leur réponse est toute naturelle :

Puisque les modèles, mis dans les conditions existantes, reproduisent l'état consécutif, on en peut conclure qu'il en serait de même avec des conditions hypothétiques. Il est important de remarquer que les prémisses du raisonnement s'appuient surtout sur les résultats constatés

dans la Seine au-dessus de l'estuaire. On ne peut rien conclure de certain sur ce qui se passe dans l'estuaire lui-même, qui change si souvent. On constate aussi dans le modèle que l'estuaire est très variable, mais ce n'est pas là une constatation positive, elle est plutôt négative. Si diverses expériences donnent des résultats différents, on n'en saurait déduire que les différences seront de même nature.

Et c'est surtout dans l'estuaire que les conditions accessoires énumérées ci-dessus — d'autres encore sans doute — sont le plus accentuées.

Néanmoins, sans accorder à de telles expériences une confiance absolue, il est impossible de leur dénier le mérite de donner des indications générales très utiles dans la conception de projets aussi difficiles que la correction des estuaires.

Nous insérons en appendice les renseignements caractéristiques que le Congrès maritime de Bruxelles de 1898 a jugé utiles à recueillir pour l'étude des fleuves à marée :

Nom du fleuve. — Description géographique sommaire; indication des affluents importants débouchant dans la partie sujette à la marée; définition de l'embouchure.

(*Nota.* — Les renseignements essentiels sont indiqués en *italiques.*)

PREMIÈRE PARTIE. — **Régime de la mer.**

1° *Carte hydrographique.* — Courbes cotidales;

2° *Courants maritimes;*

3° *Courbes de marée, vives eaux d'équinoxe, vives eaux moyennes, mortes eaux moyennes.* — Indiquer comment les moyennes sont obtenues;

4° *Vents régnants et tempêtes.* — *Leur influence sur les marées.* — Diagramme de la fréquence des vents (1). — Hauteur des vagues dans les tempêtes;

5° *Nature des fonds à l'ouest de l'embouchure et nature des côtes voisines. Transport de matières; bancs; leurs variations.*

DEUXIÈME PARTIE. — **Régime d'amont.**

1° *Débit des eaux supérieures pour le fleuve et ses affluents, étiage, crues ordinaires, crues extraordinaires; débit moyen. Epoques et fré-*

(1) Ainsi qu'il a été expliqué, page 17, la direction des vents observée seule est loin de donner les indications suffisantes pour un projet raisonné. Il faut y joindre la vitesse et l'intensité.

quence des crues. — (Indiquer les stations de jaugeage et la manière dont le débit moyen a été obtenu). — Diagrammes mensuels des débits moyens, maxima et minima. — Courbe des débits en fonction des hauteurs d'eau ;

2° *Matières charriées; leur importance; leur nature.*

TROISIÈME PARTIE.

Régime de la partie soumise à la marée.

1° *Plans avec courbes de sondages* (échelles décimales ; définir le plan de comparaison) ;

2° *Profils en long* ;

Profil suivant une ligne figurée sur les plans, avec indication.

A. — *Des lieux géométriques de hautes mers et basses mers aux états de marée définis au 3° de la première partie et pour le débit moyen des eaux douces.*

B. — *Des courbes instantanées d'heure en heure.*

C. — *Des limites de la propagation du flot.*

Mêmes renseignements pour les temps d'étiage et de grandes crues ordinaires.

Indication sur les variations du fond, naturelles ou résultant de travaux.

Hauteurs des berges. — Niveau des plus hautes eaux.

3° *Profils en travers repérés sur les plans.* — Variations ;

4° *Courbes de marée locales aux états de marée définis ci-dessus et pour le débit moyen des eaux douces* (distances entre axes en abscisses égales, à l'échelle, aux distances entre stations ; les heures en correspondance). — Courbes des vitesses de propagation de la basse mer et de la pleine mer, obtenues en joignant les pieds des ordonnées des basses mers et des pleines mers ;

5° Courbes des sections mouillées sous basse mer moyenne et entre basse mer et haute mer moyennes (abscisses : distances des stations) et des volumes introduits en différents points du fleuve (indiquer l'état de marée et celui des eaux supérieures, correspondant à chaque courbe) ;

6° Diagrammes, pour les sections considérées au 5°, des débits et vitesses moyennes par seconde (déduits des calculs des éléments dudit 5° ; abscisses : distances entre stations) et des sections mouillées correspondantes. Diagrammes des vitesses moyennes en fonction de la hauteur d'eau ;

7° *Vitesses observées en diverses stations*, en divers points de la section, à différentes hauteurs, notamment dans la région inférieure du fleuve ;

8° *Notions sur la nature et les quantités de matières charriées ;*

9° *Indications sur les variations des bancs et des chenaux ;*

10° Salure ;

11° Travaux exécutés. — Leurs résultats.

RIO GRANDE DO SUL

Nous donnons comme complément de ce chapitre quelques informations sur le Rio Grande do Sul du Brésil, bien que ce fleuve n'ait été l'objet d'aucun travail d'amélioration malgré de nombreuses études.

Le Rio Grande do Sul est l'émissaire de deux grandes lagunes *(Lagoa dos Patos* et *Lagoa Mirim)* qui elles-mêmes sont alimentées par plusieurs fleuves importants. Le canal qui porte à la mer les eaux des lagunes s'appelle Canal du Nord (fig. 318).

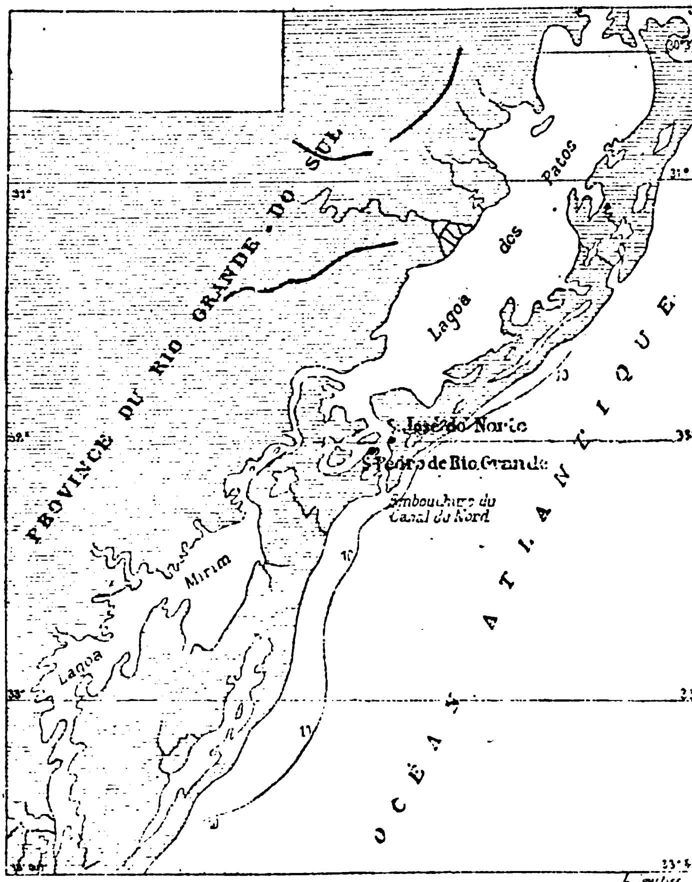


Fig. 318. — Embouchure du Rio Grande do Sul.

La profondeur moyenne y est d'une douzaine de mètres; mais l'embouchure est obstruée par une barre sur laquelle on ne sonde que 1,70 *m* d'eau. Le chenal qui conduit à la barre a souvent varié ; il est depuis un certain nombre d'années dirigé vers le Sud-Est.

L'amélioration du Rio Grande do Sul a fait l'objet de plusieurs projets dont quelques-uns dus à des ingénieurs européens très réputés, entre autres sir John Hawkshaw. La diversité de ces projets a pour cause l'insuffisance des renseignements sur lesquels ils sont basés. Il suffit de lire les caractéristiques énumérées ci-dessus, pour voir, lorsqu'on étudie les données recueillies sur le fleuve brésilien, que la plupart sont absolument insuffisantes.

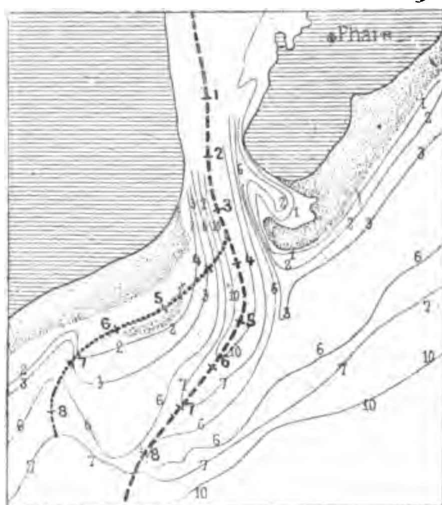


Fig. 319. — Embouchure du Rio Grande do Sul.

L'examen de l'embouchure (fig. 319), démontre qu'en tout état de cause les dispositions proposées jusqu'ici pour l'amélioration de l'entrée ne sauraient assurer le succès. S'il est permis de se baser sur les renseignements que nous avons tirés des divers mémoires connus et soigneusement comparés, la solution de la question est loin de paraître difficile et il ne semble nullement que le fleuve mérite le nom de *phénomène maritime* qu'on lui a attribué. Tout au contraire, on est fondé à penser que peu de barres se trouvent dans des conditions aussi simples de correction.

Mais une tentative de ce genre ne peut être faite qu'appuyée sur des documents complets et la question ne sera en état que lorsqu'ils auront été réunis et coordonnés scientifiquement.

L'importance du port magnifique qu'on pourrait créer dans les lagunes mérite que des études suivies et méthodiques soient entreprises.

La solution rationnelle du problème s'en dégagera aisément.

CHAPITRE XXI

PHARES

Les navires qui s'approchent d'une côte ont, par le *point*, déterminé avec une exactitude plus ou moins grande leur position ; parfois, plusieurs jours de brouillards consécutifs ont empêché les observations, et l'on a navigué à l'estime, c'est-à-dire en appréciant la situation du bâtiment d'après les directions parcourues et la vitesse relevée par les indications du *loch*. Dans ce cas, l'erreur possible est encore plus grande. Si l'approche de la terre se fait de nuit, le capitaine ne peut reconnaître le point d'atterrissement que par les phares élevés sur le littoral.

Il est des localités situées sur les grandes routes de l'Océan et où convergent, par conséquent, un nombre considérable de navires ; on les appelle points de grand atterrissement. On y établit des phares élevés et dotés du pouvoir éclairant maximum ; ce sont les phares de premier ordre.

Des feux d'une moindre intensité guident ensuite les bâtiments vers leurs ports de destination. Suivant leur importance, ils sont classés encore en six ordres différents, attribués aux passes, écueils, entrées de ports, d'après les considérations locales. Plus une côte est *saine*, moins le besoin de l'éclairage se fait sentir ; mais des rivages bien éclairés doivent avoir un nombre de feux suffisant pour qu'il y en ait toujours au moins un en vue.

En France, la situation, la classification des phares sont déterminées par un service spécial. Il en de même en Angleterre, où la Commission des phares est désignée généralement par le nom de l'hôtel où elle est installée, *Trinity-House*.

Hauteur des phares. — L'éclairage des phares est proportionné à leur importance, et l'on cherche à en faire de même pour leur hauteur. Quand ils sont placés sur une colline ou une falaise élevée, leur

hauteur propre n'a pas de raison d'être; s'ils sont établis sur une côte basse, c'est le contraire.

La hauteur donnée à la tour qui porte la lumière dépend alors de la distance à laquelle on veut que celle-ci soit visible.

La visibilité dépend de deux facteurs : la portée géographique et la portée optique.

La première est limitée par le rayon de la terre. La distance D à laquelle est visible de la surface de la mer un feu situé à la hauteur H au-dessus du niveau de la mer est donnée par la formule

$$D = 3850 \sqrt{H}$$

D et H en mètres.

Si l'observateur est lui-même situé à une hauteur h la formule devient

$$D = 3850 (\sqrt{H} + \sqrt{h})$$

H	Visibilité aux hauteurs suivantes de *h*						
	0	3	6	9	12	15	20
m	*km*	*km*	*km*	*km*	*km*	*km*	*km*
10	12	19	22	24	26	27	30
20	17	24	27	29	31	32	35
30	21	28	31	33	35	36	39
40	24	31	34	36	38	39	42
50	27	34	37	39	41	43	45
100	30	45	48	50	52	54	56

Quant à la portée optique, elle dépend de l'intensité lumineuse du feu et, bien entendu, de la vue de l'observateur et de la transparence de l'atmosphère. En général, elle est donc moindre que la portée géographique. Cependant avec les puissants feux éclairs nouvellement adoptés en France, la radiation de la lumière dans l'atmosphère est perceptible quand le phare lui-même caché sous l'horizon n'est pas visible, de sorte que la portée réelle du phare est sensiblement plus grande que sa portée géographique.

Les phares les plus élevés de France sont ceux de Cordouan, Dunkerque, Calais, des Baleines (île de Ré), d'Eckmühl, de Barfleur-Gatteville, de la Coubre et surtout celui de l'île Vierge, encore en construction, et dont le plan focal sera à 75,18 *m* au-dessus du sol. En Angleterre,

on cite ceux d'Eddystone, Bell Rock, Bishop Rock, Skerryvore, Dhu Heartach. Le phare de Gênes, construit au XVI[e] siècle, a son plan focal à 70 mètres au-dessus du niveau du sol.

Dans tous les cas, la hauteur de la plateforme où est installée la lanterne est fixée à un minimum de 12 mètres, afin de mettre l'appareil à l'abri de la malveillance et des pierres que peut soulever l'ouragan. A Fécamp, les glaces qui se trouvent à une hauteur de 17 mètres, sont souvent endommagées par les galets détachés de la falaise.

Forme des phares. — Les phares très exposés, surtout aux vagues, sont cylindriques, forme la plus résistante; mais c'est aussi la plus coûteuse et lorsqu'il ne s'agit que de résister au vent on préfère la forme octogonale. Dans les circonstances ordinaires c'est la forme carrée, la plus commode, qui est adoptée.

Résistance des tours. — Les conditions d'équilibre se déduisent de l'égalité du moment de la pression du vent et de celui du poids de la tour. Léonor Fresnel estime que l'effort du vent sur une surface cylindrique n'est que les $\frac{2}{3}$ de celui qui serait exercé sur une paroi plane ayant le diamètre de la tour. Sans tenir compte de l'adhérence des mortiers, il égale simplement le moment de l'effort avec celui du poids de l'édifice, pour obtenir les conditions d'équilibre.

Pour la sécurité, il est évident qu'on ne saurait se borner aux dimensions déduites du calcul précédent; il faut leur appliquer un coefficient de majoration. Dans la plupart des phares, ce coefficient varie de 3 à 7. Léonor Fresnel pense qu'il ne saurait descendre au-dessous de 5. Comme il a estimé la pression de vent à 275 kilogrammes par mètre carré et qu'on a observé 450 kilogrammes à Bidston (page 20), le coefficient 5 avec ce dernier nombre descendrait à 3; on ne saurait donc que conseiller de ne pas aller au-dessous.

Les tours élevées oscillent sous l'action du vent et ce mouvement est assez prononcé pour faire déverser le liquide contenu dans un vase. Il est d'ailleurs sans inconvénient dans les phares suffisamment stables.

Au phare de l'île Vierge, le coefficient de stabilité a été calculé de 10,8 et l'on attend une raideur presque absolue. Le fût est rectiligne avec fruit de 1/30.

Matériaux. — Les constructeurs cherchaient autrefois la solidité non seulement dans l'épaisseur des murs, mais encore dans le volume

des pierres de taille qui les formaient et dans leur mode d'assemblage.

A Eddystone, par exemple (fig. 320), les pierres portent dans les plans tant verticaux qu'horizontaux des queues d'aronde assurant une liaison complète. Ce dispositif a été adopté dès les fondations.

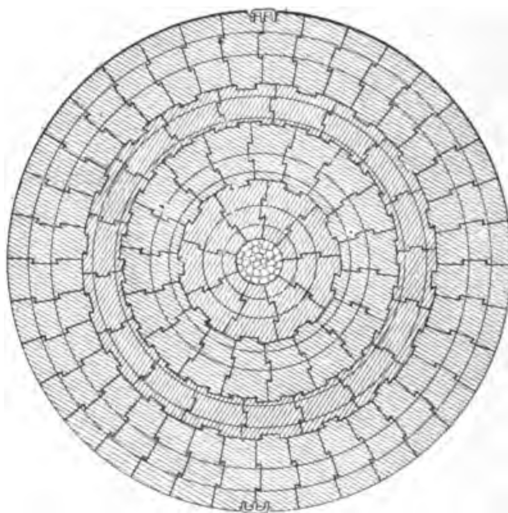


Fig. 320. — Liaison des pierres à Eddystone.

Aux Héaux de Bréhat, les assises sont de même reliées par des queues d'aronde et des dés en granite.

Ces procédés sont coûteux, malgré toute l'économie réalisée justement dans l'œuvre qui vient d'être citée.

La pierre de taille avec toutes ses sujétions est-elle indispensable? Depuis quelques années l'opinion contraire s'est produite ; au phare des Grands Cardinaux, on a exécuté la maçonnerie en moellons ordinaires et mortier de ciment de Portland, la pierre de taille, de petit appareil d'ailleurs, étant réservée aux parties où elle est indispensable. Ainsi a été transporté dans la construction des phares le procédé usité avec succès pour les tours balises. Après l'achèvement les surfaces extérieure et intérieure ont été enduites de mortier au ciment de Portland.

On a pensé que la maçonnerie, pour résister aux chocs, devait être la plus compacte et homogène possible ; de là à passer au béton, il n'y a qu'un pas, qui a été franchi à terre et le sera sans doute également dans les ouvrages exposés aux vagues.

L'avenir dira si la durée des nouvelles constructions sera aussi

grande que celle des tours élevées avec la pierre de taille choisie des anciennes tours.

Le phare de la Corbière (Jersey), d'ailleurs à 30 mètres au-dessus du niveau de la mer, est en béton. Il en est de même de celui de Raz-Tina décrit plus loin.

Fondations. — La fondation en béton de la tour est élevée à un niveau suffisant pour permettre la construction en maçonnerie (75 *cm* au-dessus des hautes mers à Eddystone ; 2 mètres au Four) ; mais il est un point important. La base de la tour doit être édifiée pleine à sa partie inférieure, afin de mieux résister à la violence des vagues. La première chambre est donc située à une certaine hauteur et la porte est atteinte par une échelle de fer scellée dans les parois.

Selon l'exposition du phare, cette hauteur varie et elle est de : 3,10 *m* à l'ancien phare d'Eddystone ; 4,25 *m* à Bell Rock ; 5 mètres à Wolf Rock ; 6,40 *m* à Chickens Rock ; 7 mètres à Bishop Rock ; 9,25 *m* à Skerryvore et 19 mètres à Dhu Heartach.

Composition de l'édifice. — La pièce principale du phare est la chambre de l'appareil d'éclairage placée au sommet de la tour. Elle comporte des accessoires indispensables : l'escalier d'accès, les magasins, les logements des gardiens et des inspecteurs chargés de la surveillance.

Phares situés à terre. — La tour des phares placés à terre peut ne contenir que la chambre de l'appareil ; les magasins, le logement des gardiens sont situés au dehors, généralement adossés à la tour avec laquelle ils communiquent. La principale précaution à prendre dans ces pièces est de les garantir de l'humidité : le meilleur procédé consiste dans l'établissement d'une cloison isolante en briques, à quelques centimètres des murs extérieurs.

Les magasins doivent être disposés avec beaucoup d'ordre. Aux phares de la troisième classe et au-dessous, une seule pièce suffit ; dans les autres il en faut deux, dont une spéciale aux huiles, tenue autant que possible à l'abri des variations de la température.

Les phares au-dessous du troisième ordre ne comportent qu'un desservant, logé avec sa famille qui peut au besoin le suppléer. Pour les trois premiers ordres il faut plusieurs gardiens ; les familles doivent être isolées les unes des autres.

Quand il y a plusieurs gardiens, dont un ou deux sont de service, une pièce de veille chauffée est nécessaire.

Quant au logement des gardiens avec famille, il se compose de deux pièces avec cheminée et de deux cabinets. Il est indispensable de leur assurer tout le confortable possible.

Phares isolés en mer. — Les tours isolées en mer n'ont souvent autour d'elles pas de place pour l'installation de magasins ou logements. Ceux-ci sont établis à différents étages de la construction; ainsi au phare du Four la disposition est la suivante :

Il comprend un rez-de-chaussée et cinq étages.

Le rez-de-chaussée est composé d'un vestibule et de deux caveaux dallés éclairés par une lucarne de 50×25 *cm*. L'un contient cinq tonneaux de charbon et une pompe pour l'alimentation d'eau; l'autre reçoit les huiles.

1er étage : Magasin. Cinq mille litres d'eau douce sont répartis dans vingt-deux caisses de tôle; deux tonnes de charbon.

2e étage : Cuisine dont la cheminée monte jusqu'à la plateforme supérieure ; placards.

3e étage : Chambre à coucher de deux lits ; placards.

4e étage : Chambre de la trompette à vapeur.

5e étage : Chambre de service.

Le service est confié à des gardiens dont les familles ne sont pas admises; elles demeurent en général au port de ravitaillement du phare; à tour de rôle, un des gardiens est envoyé à terre en congé d'un mois.

Les escaliers, autrefois à noyau plein, sont aujourd'hui presque partout à jour; on entend et l'on voit ainsi du sommet à la base de l'édifice. L'escalier qui va de la chambre de service à la lanterne est remplacé par une échelle de meunier, afin d'économiser la place.

Les magasins contiennent les objets d'approvisionnement, un matériel de service, ferblanterie, brosserie, lingerie et les outils nécessaires aux réparations.

Tours en maçonnerie. — L'intérieur des tours est presque toujours cylindrique ; en général leur diamètre est au moins égal à celui de la lanterne, c'est-à-dire à 1,40 *m*, 2,50 *m*, 3 mètres et 3,50 *m* pour les phares des quatre premiers ordres. Il atteint 3,70 *m* à Calais, 4 mètres

à la Hogue, 4,20 *m* aux Héaux de Bréhat, 4,25 *m* à Eddystone et 4,50 *m* au Four. Il faut évidemment plus de place dans les édifices contenant eux-mêmes le logement.

La hauteur des phares isolés en mer ne dépend pas seulement de la portée qu'on veut leur attribuer; elle doit encore mettre la lanterne à l'abri de l'atteinte des vagues. A Bishop Rock, qui se trouve sur un rocher exceptionnellement exposé (fetch = 3600 milles), une cloche de 250 kilogrammes a été brisée à 30 mètres de hauteur par les paquets de mer (page 82). M. Douglass a trouvé des petites pierres sur le toit des bâtiments annexés au phare de Round-Island, à 44 mètres de hauteur.

Ces phares sont bâtis sur des fondations pleines en maçonnerie, qui s'élèvent jusqu'à une certaine hauteur au-dessus du niveau de la mer. Ce n'est qu'au-dessus de cette fondation que commence la tour proprement dite.

Profil extérieur. — L'extérieur de l'édifice affecte en général la forme d'un tronc de cône, dont la section diminue de la base au sommet. La génératrice du tronc de cône, qui détermine le fruit, est variable de forme. Parfois, c'est une ligne droite (Ar-Men); d'autres fois, et surtout en Angleterre, c'est une courbe (ellipse au nouveau phare d'Eddystone et à celui de Bishop Rock, hyperbole à Skerryvore, parabole à Dhu Heartach. Le profil concave, au moins à la partie inférieure, offre plus de stabilité et brise mieux la lame, mais a l'inconvénient de favoriser l'ascension de la nappe liquide, qui se répand en embrun sur la lanterne.

Cet inconvénient a été évité en grande partie au nouveau phare d'Eddystone et à celui de Bishop Rock, en donnant à la base de la tour une forme cylindrique jusqu'à 75 *cm* au-dessus de la haute mer au premier et sur 12 mètres de hauteur à l'autre. Il a été constaté que la base était plus fortement choquée, mais qu'en revanche la vague s'élevait moins haut qu'avec l'ancienne forme; au Grand-Charpentier, au contraire, la partie inférieure se raccorde à la fondation elle-même par une courbe elliptique.

Diamètre extérieur. — Le diamètre extérieur de la base dépend du diamètre intérieur, l'épaisseur devant assurer la solidité. Lorsque le rocher n'offre que strictement la surface nécessaire à l'établissement de la tour, c'est au contraire le diamètre extérieur qui est déterminé

et la dimension intérieure s'en déduit. Tel a été le cas pour le phare d'Ar-Men.

Plateforme. — La chambre de la lanterne est supportée, dans les grands phares, par une voûte en briques dont la clef est une forte pierre de taille destinée à supporter le pied de l'appareil. La tour est terminée à sa partie supérieure par une plateforme en encorbellement, entourée d'une balustrade métallique.

Cette plateforme porte une cuve en maçonnerie de 1,50 *m* de hauteur environ qui forme le soubassement de la lanterne, dont les montants sont fixés à la paroi interne. Parfois cette cuve est en tôle; elle est fixée sur la plateforme et les montants de la lanterne y sont boulonnés.

Chambre de service. — C'est la chambre où couche le gardien qui doit au besoin assister celui de quart; elle est située au-dessous de celle de l'appareil. Des précautions sont prises pour que les courants d'air qui peuvent s'y déterminer ne pénètrent pas dans la lanterne.

Lanternes. — Les lanternes sont de forme cylindrique ou polygonale; elles se composent de montants métalliques sertissant des glaces et d'une coupole. Si elle est polygonale, le nombre des côtés est de 16, 12 et 10 pour les phares de premier, second et troisième ordres et de 8 pour les autres.

En France les montants, toujours droits, sont des barreaux de fer verticaux de 25 millimètres d'épaisseur, reliés par des barreaux horizontaux de même force.

En Angleterre, où les cages sont toujours cylindriques, les montants sont inclinés en hélices et se coupent en losanges remplis par des glaces bombées.

Les montants verticaux ont l'inconvénient, dans les feux fixes, de cacher une partie de la lumière ; mais les lanternes ainsi construites sont moins chères et l'on s'en contente pour les feux d'ordre inférieur ; elles sont inadmissibles pour les phares électriques.

Les coupoles sont en cuivre rouge ; les plus soignées sont formées de fuseaux doubles qui s'assemblent comme des voussoirs et ont l'avantage d'assurer une température plus constante.

Ventilation. — La ventilation est d'une grande importance dans la chambre de l'appareil; sans elle il se produit à la surface interne du vitrage une abondante condensation qui diminue beaucoup l'intensité de la lumière.

L'air qui y pénètre entre par les fenêtres de la chambre de service chauffée par un poêle ; il est bon de disposer quatre ouvertures, afin qu'il y en ait toujours une sous le vent, par laquelle l'accès de l'air se fait sans danger pendant les fortes brises.

Des orifices disposés autour de la circonférence du plancher dirigent le courant aérien contre le vitrage qui est ainsi desséché ; l'air passant par une ouverture pratiquée dans le plafond s'échappe par la boule de la lanterne.

Cette boule porte un paratonnerre.

ÉCLAIRAGE

L'éclairage des phares, après avoir subi bien des transformations depuis le fagot antique, a reçu à la fin du siècle dernier un grand perfectionnement par l'invention de l'éclairage *catoptrique*, dû à Teulère.

Le système se compose de lampes à mèche circulaire et à double courant d'air d'Argant, munies de réflecteurs paraboliques qui renvoient la lumière sous la forme de cônes dans la direction de l'horizon.

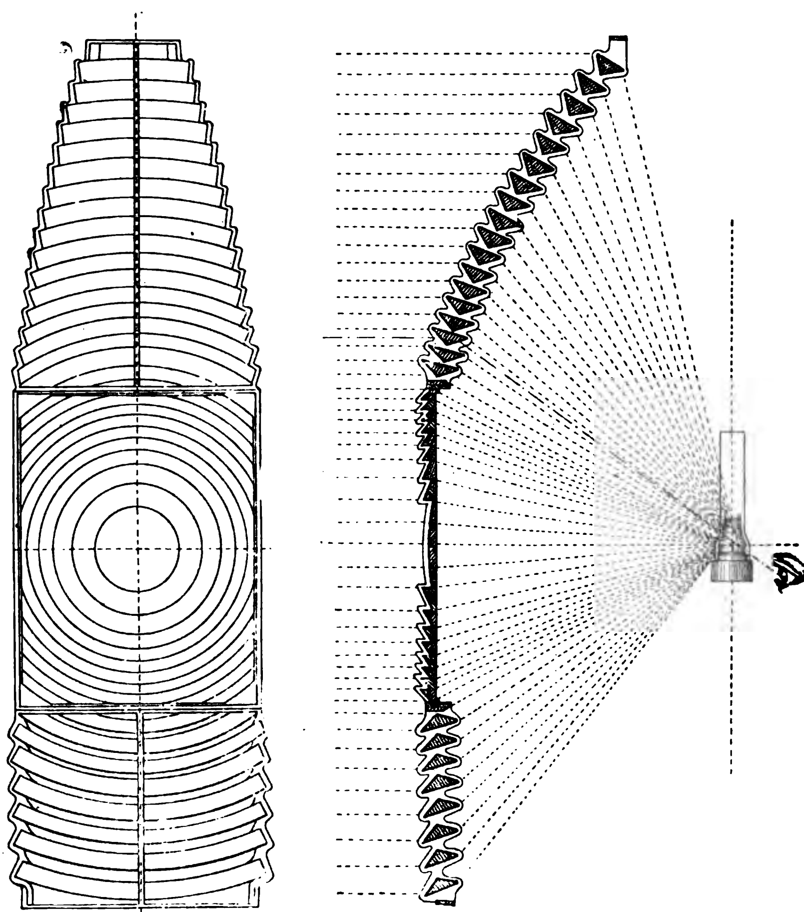
Ces cônes n'éclairant qu'une portion limitée de l'espace, l'appareil complet se compose de plusieurs lampes à réflecteurs, réunies sur une couronne animée d'un mouvement de rotation par un mécanisme d'horlogerie. Chaque point de la mer est ainsi successivement illuminé.

On superposait plusieurs couronnes de lampes en les alternant, de façon à obtenir un éclairage plus intense.

Feux fixes. — Fresnel a réalisé un immense progrès par l'invention de l'appareil *dioptrique* où le réflecteur est remplacé par une lentille plan-convexe à axe horizontal; la flamme est placée au foyer principal de la lentille. Les rayons lumineux partis de la lampe sont réfractés par la lentille et en sortent parallèles et horizontaux. On les dirige sur l'horizon.

Mais au delà de 10 à 11° de l'horizontale les lentilles donnent une aberration considérable, c'est-à-dire laissent fortement diverger les rayons. Pour y remédier, Fresnel remplaça la lentille unique, qui d'ail-

leurs aurait absorbé trop de lumière, par plusieurs *en échelons*, ayant des rayons de courbure différents calculés de façon à ramener à l'horizontalité les rayons lumineux.



Vue de face. Fig. 321. — Disposition des lentilles. Coupe latérale.

Au delà de 40° cet artifice est encore insuffisant à corriger l'aberration. Fresnel plaça autour des lentilles des prismes triangulaires en verre dans lesquels les rayons lumineux, successivement réfractés et réfléchis, prennent aussi la direction horizontale (fig. 321).

Cette dernière portion, composée de prismes, constitue la *zone catadioptrique;* l'ensemble des lentilles a reçu le nom de tambour dioptrique. Toutes les pièces de verre sont encastrées dans un châssis métallique.

La lampe et les panneaux reposent sur un plateau porté par une colonne en fonte ou posé sur le plancher.

Feux divers. — Le dispositif précédent rend les rayons parallèles dans le plan vertical, mais ils restent divergents horizontalement et sont visibles de tous les points de l'horizon. On lui donne le nom de *panneau fixe*.

Afin de se différencier les uns des autres, les phares émettent des lumières intermittentes ou colorées. Les couleurs usitées sont le rouge et le vert, les seules qu'il soit facile de distinguer. La coloration a l'inconvénient d'absorber une grande partie de la lumière : aussi les feux rouges et verts doivent-ils être beaucoup plus forts que les feux blancs. Dans les appareils fixes, c'est la cheminée de la lampe qui est colorée.

Feux variables. — On différencie encore les phares par l'émission de rayons à éclats ou tournants. L'appareil éclairant — *l'optique*, comme il se désigne ordinairement — est alors porté sur un plateau à bord denté, roulant sur des galets en bronze. Le mouvement est donné par le mécanisme des horloges à poids, un treuil muni d'un régulateur composé d'ailettes pour les petits feux et pour les grands d'un pendule analogue à celui de Watt.

Les panneaux optiques sont formés de cadres en bronze sertissant les lentilles. Chaque fois que l'un d'eux passe devant la lumière, il envoie un faisceau de rayons à l'horizon.

Devant les lentilles on peut placer des verres colorés.

Les feux à éclats apparaissent à intervalles divers, qui caractérisent les phares : de minute en minute, à 30 secondes de distance, etc. ; les plus rapides descendent à intervalles de 3 secondes. On les appelle scintillants quand l'intervalle de leurs apparitions est d'une seconde. On groupe encore les éclats, ce qui permet, en y comprenant les verres colorés, de varier de nombreuses manières les projections et de rendre ainsi le phare facilement reconnaissable.

Intensité. — Les phares sont classés suivant leur intensité lumineuse en sept ordres dont les appareils varient par leurs distances focales, qui sont respectivement en millimètres :

920 700 500 375 250 185 150

L'intensité se calcule en France en lampes carcels. L'étalon est la lampe de 18 millimètres de diamètre intérieur brûlant 40 grammes de colza à l'heure.

L'unité anglaise est la bougie (*candle*) qui équivaut à peu près au dixième de la carcel.

Lampes. — Dans les petits feux on emploie des lampes à une mèche circulaire ordinaire. Pour les plus importants, les becs sont à plusieurs mèches. Ils sont formés de cylindres concentriques (deux pour les phares au-dessous du troisième ordre, trois pour le second, quatre pour le premier), formant des vases annulaires, réservoirs d'huile où plongent des mèches également cylindriques, alternant avec des espaces vides de même largeur.

En Angleterre le nombre des mèches a été porté jusqu'à dix ; leur diamètre atteint 22 *cm*. Le porte-mèches est surmonté de deux ou plusieurs enveloppes infléchissantes semblables à la base des cheminées de verre, et qui forcent les flammes extérieures à s'incliner vers les intérieures, sur lesquelles elles ramènent le courant d'air ascendant. Cette disposition assure une meilleure combustion et par suite une intensité maxima pour une quantité donnée d'huile.

En Irlande, le gaz est employé dans des brûleurs à jets multiples, (plus de cent), percés dans un cercle de 28 *cm* de diamètre, donnant 230 becs carcels.

Appareils superposés. — Pour augmenter l'intensité des lumières, les ingénieurs anglais, après M. Henry-Lepaute, ont superposé des panneaux dioptriques. Ainsi au nouveau phare d'Eddystone, l'appareil comprend deux étages composés chacun de douze panneaux lenticulaires. Chaque panneau est composé d'une lentille centrale et de 39 anneaux, dont le foyer commun a une largeur de 920 millimètres. Au foyer de chaque étage est placé un brûleur de sept mèches, dont l'intensité est de 950 bougies. On n'en allume qu'un en temps ordinaire; le second renforce le feu durant les brouillards assez épais pour empêcher de distinguer la lumière de la digue de Plymouth. L'intensité obtenue est alors de 160 000 bougies.

Un appareil composé de deux étages est dit biforme; celui de Mew Island est triforme et celui de Galley Head quadriforme.

En même temps l'intensité des brûleurs était augmentée par la multiplication des mèches.

Mais les Anglais eux-mêmes critiquent la dépense supplémentaire occasionnée par ces appareils multiples, qui ont de plus l'inconvénient d'accroître la divergence des rayons, tandis qu'au contraire on doit chercher à la réduire.

Appareil hyper-radiant. — L'augmentation de l'éclat du faisceau n'est pas proportionnel à l'intensité du feu nu. Le desideratum était l'augmentation des dimensions des appareils optiques. Récemment (1885) le diamètre des lentilles du premier ordre a pu être porté de 920 millimètres à 1,33 *m*, et elles ont été appliquées à des appareils dits *hyper-radiants*.

Le système a été adopté en France pour l'éclairage du phare d'Antifer, au nord du Havre. L'optique avait 2,66 *m* de diamètre intérieur et se composait de six panneaux annulaires complets, comprenant douze éléments catadioptriques inférieurs, dix dioptriques intermédiaires et vingt-six éléments catadioptriques supérieurs. La lampe portait six mèches.

L'optique repose sur une table élevée sur six colonnes. Un chariot à galets coniques en acier porte l'armature de l'appareil dont la base, constituée par un plateau mobile à circonférence dentée engrène avec le pignon de la machine de rotation. L'appareil exécute sa rotation en deux minutes, donnant un éclat toutes les vingt secondes.

L'appareil, qui coûtait 94 000 francs, donnait 22 000 carcels.

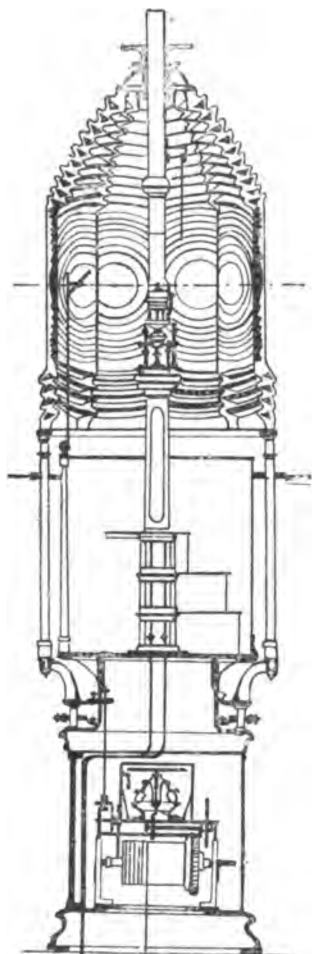
La pratique n'a pas réalisé les espérances conçues; on a reconnu au système de nombreux défauts et il a été abandonné.

Eclairage au bec Auer. — Au phare de Chassiron et dans les phares de seconde ligne qui ne comportent pas l'éclairage électrique, on a adopté un brûleur Bunsen avec manchon Auer de 30 centimètres de diamètre, alimenté au gaz d'huile sous la pression de 1,50 *m* d'eau, à raison de 4 litres par bec Carcel. L'intensité a atteint 20 000 carcels. C'est également le bec Auer qui a été employé dans les feux-éclairs.

Le Service des phares français a proscrit l'usage du gaz ordinaire, qui présente de nombreux inconvénients; mais en outre du gaz d'huile, il emploie aussi avec le manchon Auer la vapeur obtenue par la vaporisation du pétrole au moyen de la chaleur perdue du brûleur lui-même.

Eclairage du phare de Faraman (fig. 322). — On a réuni dans ce phare les améliorations récentes introduites dans les phares français.

L'appareil est multifocal ; il se compose de cinq panneaux formés chacun de deux lentilles dissymétriques dont les axes principaux font un angle de 23°; ses éclats se trouvent ainsi émis par groupe de deux. Dans chaque groupe ils durent une seconde et sont séparés par une petite éclipse de deux secondes. Une grande éclipse de six secondes sépare chaque groupe de celui qui le précède et de celui qui le suit. La révolution s'accomplit en cinquante secondes.



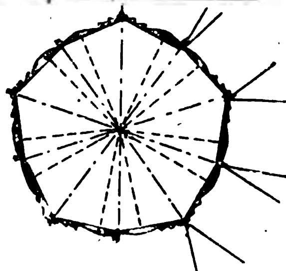


Fig. 322.
Optique du phare de Faraman.

Un réflecteur sphérique renvoie à la mer la lumière perdue du côté des terres. La réduction du rayon de ce réflecteur a amené une grande économie.

On a à signaler encore :

La substitution des galets coniques aux sphériques pour le chariot de roulement.

L'installation d'un remontoir de poids moteur permettant de relever ce poids sans arrêter la machine.

Un dispositif assurant l'uniformité du mouvement, par un pendule compensateur.

Un avertisseur électrique des arrêts de l'appareil.

La constance de niveau des lampes.

Feux-éclairs.— Un nouveau progrès, immense, a été réalisé par Bourdelle, l'inventeur des feux-éclairs. L'innovation consiste à réduire la durée d'apparition des éclats au temps strictement nécessaire à la perception intégrale de leur intensité.

Il a été reconnu que la durée des éclats est sans influence sur la valeur du caractère d'un feu ; elle peut être réduite sans inconvénients à $\frac{1}{10}$ de seconde.

Le capitaine d'un navire prend et rectifie son relèvement sur les apparitions successives.

Dans le système Bourdelles, les éclats se succèdent toutes les cinq secondes. Mais le mouvement de l'optique sur chariots de galets était un moyen trop peu sensible pour se prêter à cette rotation rapide, car il faut que l'appareil, composé d'un, de deux ou de quatre panneaux tourne entièrement en cinq, dix ou vingt secondes.

Pour y parvenir, l'arbre vertical qui porte l'optique repose sur un flotteur annulaire plongeant dans une cuve à mercure, de telle sorte que le poids total soit contre-balancé par la poussée du liquide. Le mouvement d'horlogerie est alors suffisant pour donner la vitesse voulue.

Feux-éclairs à diverses lentilles. — Le premier appareil de ce système a été mis en service en 1892 sur la pointe de Sénétose en Corse; il était de quatrième ordre. Par prudence ce feu comportait quatre lentilles, ce qui assurait à la vitesse de rotation une transition entre les anciens appareils et le nouveau.

Mais il y a tout avantage à diminuer le nombre des lentilles. La lentille unique avec réflecteur sphérique en verre argenté est la meilleure à tous les points de vue. Par elle-même elle utilise la moitié de la lumière émise par la flamme et par le réflecteur le tiers de l'autre moitié. Elle réduit au minimum le prix de revient de l'optique, qui n'embrasse qu'un hémisphère. Le gardien surveille mieux la flamme.

L'inconvénient est qu'elle exige des becs de grandes dimensions, surtout si comme en France on ne dépasse pas le nombre de six mèches en vue de la simplicité et de la sécurité du service.

Aussi avec les lampes borne-t-on l'emploi des appareils à lentille unique aux phares de troisième ordre et au-dessous. La puissance d'un feu-éclair de troisième ordre (15 000 carcels) est d'ailleurs plus que double de celle des feux ordinaires de premier ordre; les dépenses d'entretien sont équivalentes.

Les feux à deux lentilles n'exigent pour leur flamme que des dimensions relativement restreintes et s'appliquent aux appareils de tous les ordres. Ceux du premier ordre donnent une puissance lumineuse de 40 000 carcels, supérieure de 50 % à celle d'un appareil hyperradiant de 1,33 *m* de longueur focale qui coûte plus cher.

Pour les phares de troisième ordre et au-dessous, le type à lentille unique est très supérieur à celui de deux lentilles.

Quant à celui de quatre lentilles, il est presque abandonné.

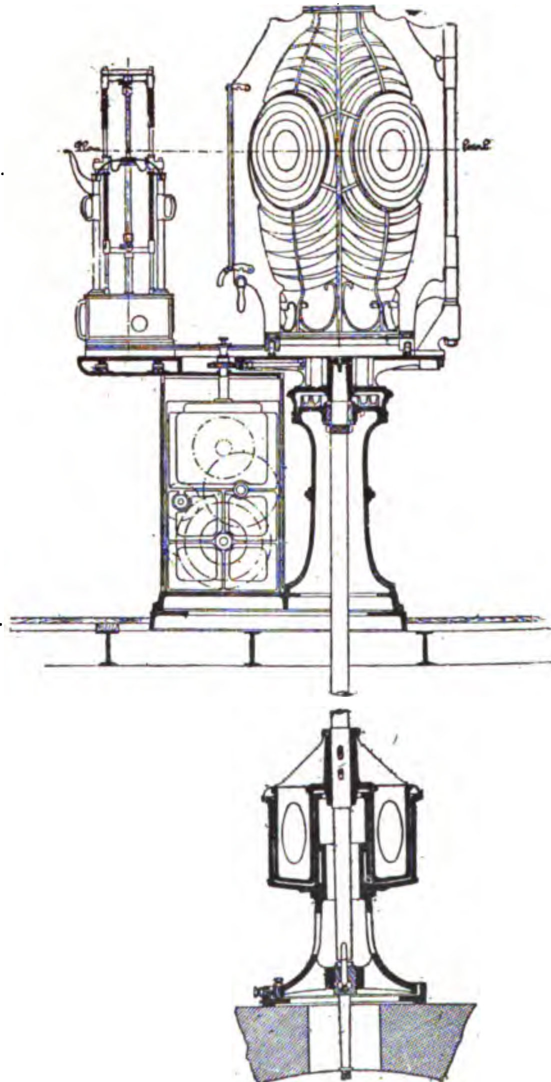


Fig. 323. — Appareil à quatre lentilles pour feu-éclair électrique.

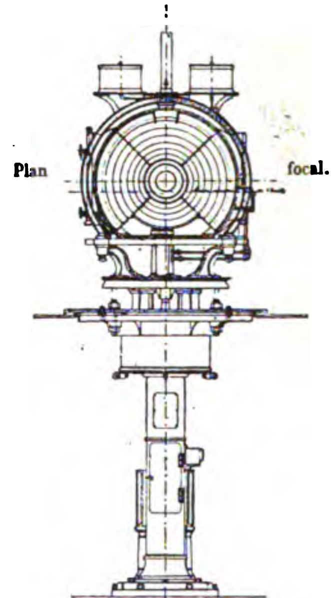


Fig. 324. — Gravelines. Phare de 4e ordre. — Feu-éclair à deux lentilles.

Phare de quatrième ordre à deux lentilles. — Comme type de ce système nous décrirons le phare de Gravelines (fig. 324), d'après une notice du Service des phares :

Chacune des lentilles peut tourner autour d'un axe vertical commun placé sur les bords contigus du plus grand anneau, et solidement main-

tenu sur le plateau qui porte l'optique. Pendant leur rotation elles sont soutenues et guidées par des galets. Des arrêts limitent leur ouverture, calculé de façon à rendre facile le service.

Quand l'optique est fermée, les armatures de chaque lentille sont appliquées l'une contre l'autre et fortement serrées par des loquets. Un butoir fixé sur le plateau permet, après la fermeture, de placer toujours les lentilles dans leur position normale.

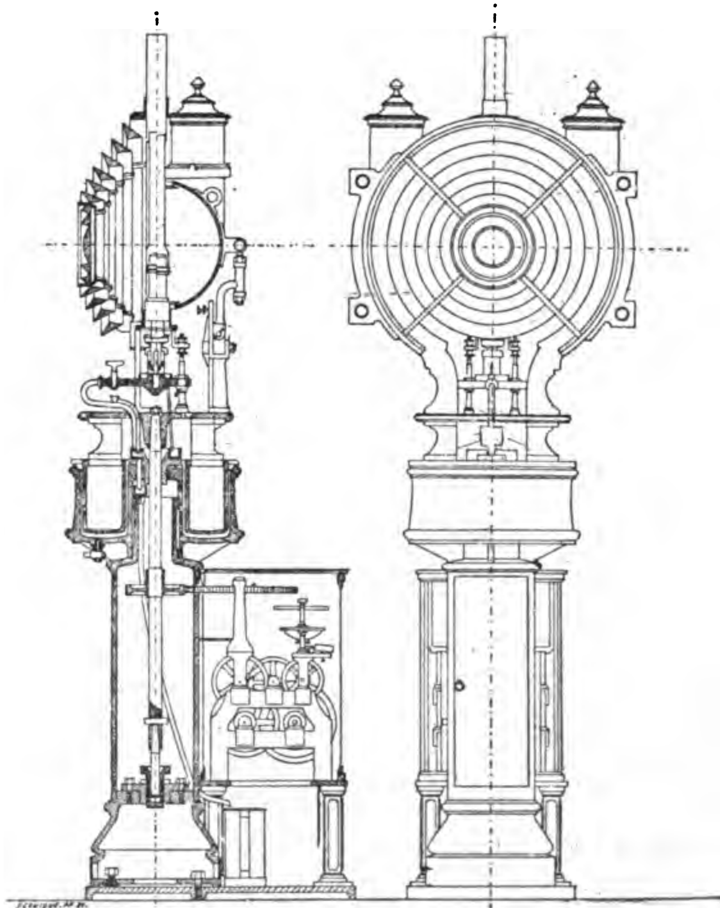


Fig. 325. — Appareil de 5e ordre pour feu-éclair à lentille unique.

Les réservoirs d'alimentation du bec sont placés au-dessus de l'optique et supportés par une ossature qui est fixée à son pied dans le plateau.

Le système de rotation de l'appareil est logé tout entier dans la chambre de la lanterne. Il est constitué par une colonne en fonte fixée sur

le sol de cette chambre et portant la cuvette à mercure, qui est maintenue par des vis horizontales, tournant dans des écrous portés par une plaque annulaire en fonte reposant sur la galerie intérieure de la lanterne. Le desserrage des vis et l'enlèvement des arrêts qui supportent la cuve permettent de l'abaisser et de la visiter.

L'optique et son plateau de base sont portés par le flotteur. Le jour, ils reposent sur la plaque annulaire au moyen de vérins relevés de la quantité voulue. Il est alors facile, pour l'entretien, de démonter l'arbre ainsi que son pivot et sa crapaudine.

Appareils de cinquième ordre à lentille unique.— La figure 325 représente cet appareil qui est muni d'un réflecteur sphérique. Il est éclairé par une lampe à huile à niveau constant d'un modèle spécial.

Becs à joint de mercure. — C'est une disposition qui permet de changer rapidement les becs et le nombre de leurs mèches afin de mettre en rapport l'intensité de la flamme avec la transparence de l'atmosphère.

Machines de rotation. — Elles n'ont besoin que d'une faible puissance, mais il faut l'augmenter pour être certain que les résistances accidentelles ne pourraient l'arrêter. La marche régularisée par un frein automatique et un avertisseur électrique prévient le gardien des accidents fortuits ou du déroulement complet de la corde du poids moteur.

Eclairage électrique. — Pour les phares de grand atterrissage, la France emploie exclusivement l'éclairage électrique et l'application à cet éclairage des feux-éclairs a donné des intensités lumineuses sans précédent.

Le nombre des phares électriques français s'élève aujourd'hui à 13, savoir :

La Hève, Gris-Nez, Dunkerque, Calais, la Canche, les Baleines (île de Ré), Planier (Marseille), Creac'h (Ouessant), Belle-Ile, Barfleur, île d'Yeu, la Coubre (Gironde) et le phare d'Eckmühl à Penmarch.

Des mesures photométriques ont montré que le rendement lumineux ne croît pas proportionnellement à l'énergie. Sous 45 volts, on a constaté que pour des régimes de 25, de 50 et 100 ampères, les rendements (en 100 000 becs carcels) étaient comme les ordonnées de la courbe ci-contre (fig. 326).

Il ne faut donc pas dépasser certaines dimensions, sauf à associer deux appareils moyens pour produire un effet supérieur.

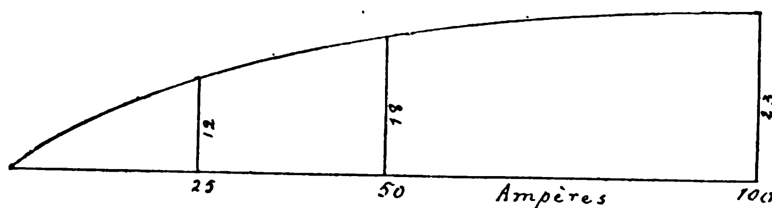


Fig. 326.

C'est ce qui a été fait au phare d'Eckmühl, le dernier établi en France, dû à la générosité de la marquise de Blocqueville et dont voici la description d'après M. de Joly :

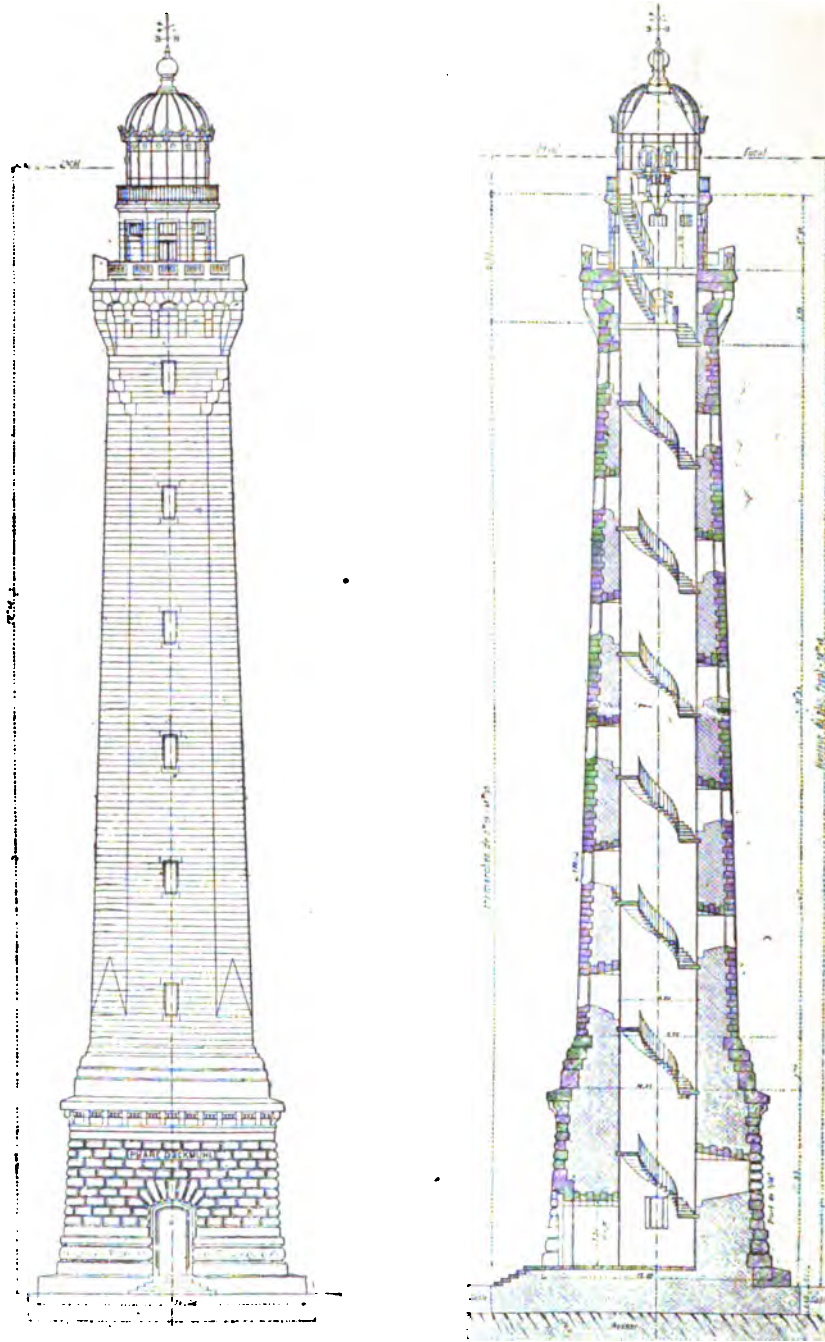
Phare d'Eckmühl. — L'appareil consiste essentiellement en la juxtaposition, sur une même embase tournante, de deux optiques bifocales à quatre panneaux. L'embase tournante est un plateau en fonte supporté par un arbre vertical en fer forgé, solidaire du flotteur à mercure caractéristique du système de rotation des feux-éclairs. L'arbre est guidé à sa partie supérieure par un manchon en bronze et s'engage à sa partie inférieure dans un coussinet, également en bronze, par un pivot démontable en acier qui repose sur une crapaudine.

Le coussinet peut se mouvoir verticalement dans un écrou de manière à permettre de régler la hauteur de la crapaudine et par suite celle de l'embase de l'optique par rapport à un pont de manœuvre mobile qui sert à l'introduction et au changement des régulateurs électriques.

Les deux optiques portées sur un plateau en fonte peuvent s'ouvrir diagonalement en pivotant autour d'un axe central. L'optique où l'on veut faire une manœuvre de régulateur étant ouverte et l'embase convenablement réglée et orientée, la voie ferrée qui existe sur le pont de manœuvre se trouve en concordance avec une autre voie fixée sur l'embase. Le régulateur à mettre en service peut alors être poussé sur cette dernière voie jusqu'à des arrêts qui le placent dans sa position normale, où il se trouve en contact avec des peignes en cuivre fermant le courant sur la lampe.

Les conducteurs électriques qui partent des machines se rendent chacun dans un auget annulaire rempli de mercure et constitué par

une matière isolante. Chacun des conducteurs qui aboutissent aux deux



Elévation. Fig. 327 — Phare d'Eckmühl. Coupe.

régulateurs plonge de même dans un auget et ferme le courant par l'intermédiaire du mercure malgré la rotation de l'appareil.

Les avantages du système de rotation adopté pour les feux-éclairs sont surtout sensibles pour les feux électriques, car les poussières produites par la combustion des charbons paralysent rapidement le fonctionnement des chariots à galets antérieurement en usage.

La rotation de l'appareil s'effectue en 20 secondes, donnant toutes les cinq secondes des éclats réguliers blancs. On emploie des charbons de 10 *cm* de diamètre pour 45 ampères et de 16 *cm* pour 50 ampères sous 45 volts. Avec 50 ampères dans chaque optique, soit en tout 100 ampères et 4 500 watts, la puissance lumineuse dépasse 3 000 000 de becs carcels (fig. 327).

Machines. — Dans les premiers phares français on employait les machines de la Compagnie l'*Alliance*. Plus tard, les machines de Méritens éclairèrent tous les phares électriques du monde ; mais on les juge maintenant coûteuses et encombrantes et on leur a substitué des alternateurs du système Labour.

Au phare d'Eckmühl il y a deux alternateurs diphasés susceptibles d'être accouplés mécaniquement. L'induit de ces alternateurs porte deux circuits superposés chevauchant l'un sur l'autre, chaque circuit fournissant à la vitesse de 800 tours un courant de 25 ampères à l'une des optiques jumelles. Un seul alternateur suffit dès lors pour assurer le service, l'autre étant en réserve pour les jours de brouillard.

Les moteurs à vapeur sont, dans les phares récents, munis d'un aéro-condenseur spécial qui permet de récupérer 75 °/₀ de l'eau vaporisée.

Comme lampes, on emploie le régulateur Serrin, avec des modifications introduites par MM. Berjot, Meurs, Le Baron, Ciolina, etc.; ces mécanismes ont besoin d'une constante surveillance.

En Angleterre, l'éclairage électrique s'est peu répandu ; il n'y a que quatre phares, qui en soient pourvus et le plus puissant d'entre eux, celui de Sainte-Catherine (île de Wight) n'a comme intensité que 600 000 becs carcels. Plusieurs pays étrangers ont adopté ce puissant éclairage pour leurs phares les plus importants (Odessa, Port-Saïd, Maquarie en Australie, Tino en Italie devant la Spezzia).

CONSTRUCTION DES PHARES

Quand les phares sont construits sur la terre ferme, ils ne présentent aucune difficulté de construction. Il en est tout autrement lorsqu'on doit les fonder sur des écueils isolés en mer émergeant ou non à la marée basse. Les difficultés se compliquent encore le plus souvent de celle des approvisionnements, si le port d'attache des travaux se trouve très éloigné ; le phare d'Eddystone était construit à 24 kilomètres de la base d'opérations ; celui de l'ilot des Evangélistes est isolé dans le Pacifique à une grande distance du port le plus voisin, Punta Arenas.

Dans ces conditions, un grand vapeur est attaché à l'entreprise et doit porter tous les objets nécessaires.

Ainsi, à la Banche, à 13 kilomètres du Pouliguen, on ne rentrait pas chaque jour. On faisait mouiller dans le voisinage une flotille employée à la construction et se composant de deux gabares de 40 à 50 tonneaux de jauge, d'un petit sloop à vapeur de 10 chevaux et de 3 grands canots dont 1 de sauvetage. Les fonds qu'on rencontrait au Pouliguen ne permettaient pas l'emploi de bâtiments plus forts.

Quand les distances sont moins grandes, il faut chaque jour transporter les travailleurs et les matériaux à pied d'œuvre.

L'atterrissage est souvent très difficile et a plus d'une fois occasionné mort d'homme. Il est même parfois impossible de songer à construire sur des écueils trop exposés à la vague ou aux courants, quelque intérêt que puisse présenter un phare dans la localité.

Mais l'impossibilité n'est pas toujours absolue. Le phare d'Ar-Men, par exemple, a été édifié sur l'un des rochers émergents qui constituent la « Chaussée de Sein » célèbre par ses naufrages. L'établissement en a été décidé sur un rapport de l'ingénieur hydrographe Ploix qui disait : « C'est une œuvre excessivement difficile, presque impossible, mais peut-être faut-il tenter l'impossible, eu égard à l'importance capitale de l'éclairage de la chaussée ». Les courants dépassent là 8 nœuds, et y rendent la mer très grosse.

Reconnaissance. — La reconnaissance de la roche doit être faite avec le plus grand soin ; si elle émerge à basse mer, on pratique des sondages avec les instruments de mineurs. Il importe de ne fonder que sur un rocher solide. Or, à la Banche, par exemple, la préparation des fondations montra que le rocher, résistant à la surface, devenait tendre

au-dessous par suite de la présence d'amas de matières calcaires non agrégées. Si cette couche avait continué, il eût été impossible d'y asseoir des fondations ; heureusement ces amas ne constituaient que des poches isolées qu'on put vider.

Une fois les reconnaissances faites, les travaux commencent par l'installation des moyens de débarquement

Débarquement. — Ce n'est pas là chose facile. Le plus souvent à peine a-t-on pu forer quelques trous dans la roche que l'on y scelle des crochets pour retenir les haubans qui maintiennent vertical un mât auquel on attache des cordes; elles servent de point de retenue aux ouvriers, et aussi à l'établissement d'un va-et-vient avec les embarcations mouillées dans le voisinage.

Pour les matériaux, on dresse, si on le peut, un mât de charge avec corne oblique, établi sur une saillie du rocher ; il prend les matériaux à bord et les dépose par un mouvement tournant sur quelque point saillant. Un autre mât semblable est dressé sur la construction à mesure qu'on l'élève et reprend les matériaux pour les porter à la hauteur voulue.

Quelques exemples donneront une idée des moyens usités en pareil cas et qui varient nécessairement avec les conditions de chacune des constructions projetées. Ils feront connaître en même temps les systèmes de fondations les plus usités.

Ar-Men. — A Ar-Men, pendant six ans personne n'avait pu débarquer. M. Ploix ne s'en était approché à moins de 15 mètres ; un autre ingénieur avait réussi à ranger la roche de près ; on avait ainsi vu qu'elle avait une largeur de 7 à 8 mètres au niveau des basses mers sur une longueur de 12 à 15 mètres, que sa surface était fort inégale et divisée par de profondes fissures ; enfin que, presque accore du côté de l'est, elle s'inclinait en pente douce à l'opposé.

On s'arrêta au mode de construction suivant :

Percer dans la roche, sur tout l'emplacement du futur édifice, des trous de fleuret de 30 *cm* de profondeur, espacés d'un mètre, et quelques autres en dehors de cette limite. Les derniers étaient destinés à recevoir des organeaux afin de faciliter les accostages ou tenir des haubans ; les premiers au scellement de goujons en fer ayant pour objet à la fois de fixer la maçonnerie au rocher et de faire servir la construction elle-même à la liaison des diverses parties de cette roche

fissurée ; on pourrait consolider ainsi une base qui n'inspirait qu'une confiance limitée. D'autres goujons verticaux et de fortes chaînes horizontales en fer seraient introduits dans la maçonnerie au fur et à mesure de son élévation, pour s'opposer à toute disjonction.

Ce furent les pêcheurs de l'île de Sein qui se chargèrent de ce travail ; quand ils pouvaient accoster, des bateaux de pêche débarquaient deux hommes munis de ceintures de sauvetage, qui se couchaient sur la roche, s'y cramponnant d'une main et travaillant de l'autre, au milieu des vagues. Parfois ils étaient emportés et une embarcation allait les recueillir. En 1867 on n'eut que sept accostages et huit heures de travail ; en 1868, seize accostages et dix-huit heures de travail ; en deux années 55 trous furent percés.

En 1869 commença la construction. Des goujons en fer galvanisé, de 6 *cm* d'équarrissage et de 1 mètre de longueur furent implantés dans les trous et la fondation fut entreprise en petits moellons bruts au ciment pur de Parker Medina à prise rapide, condition indispensable dans un travail où il fallait veiller la moindre accalmie.

La campagne produisit 25 mètres cubes de maçonnerie. Depuis 1871 on travailla au ciment de Portland avec lequel furent rejointoyés les ouvrages exécutés au ciment de Médina. En 1881 le phare était achevé.

Grands Cardinaux (1877-1879). — Ce phare est élevé sur la roche

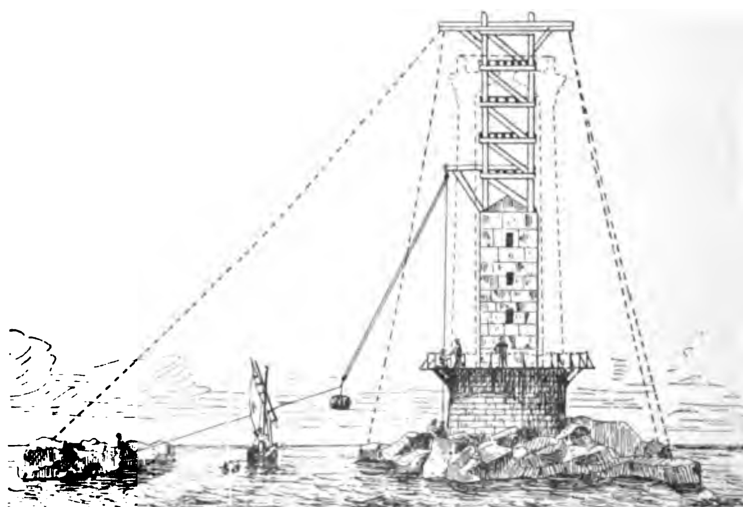


Fig. 328. — Construction du phare des Grands-Cardinaux.

de *Grougue-Guès*, à l'extrémité de la presqu'île de Quiberon, roche à

surface irrégulière, dont n'émergent que quelques pointes, directement exposées à la houle de l'Océan. Le port de ravitaillement était le Palais (Belle-Ile), à 24 kilomètres.

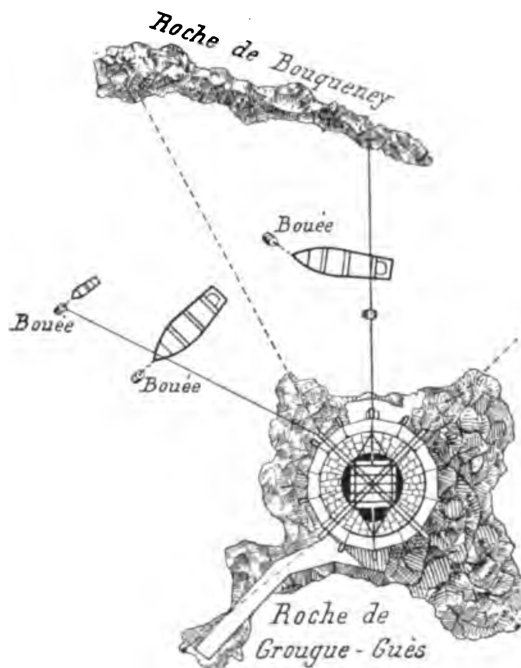


Fig. 329. — Construction du phare des Grands-Cardinaux.

On a déjà décrit le système de construction qui a été adopté et qui a beaucoup facilité les travaux en réduisant surtout les sujétions de débarquement des matériaux. On a procédé sans installations spéciales et comme pour une tour balise, et dès la première année la tour a pu être élevée à 6 mètres au-dessus des hautes mers ; elle était dès lors à l'abri des lames.

Sur un échafaudage en charpente plus élevé que le futur phare, sorte de sapine de 3 mètres de côté soutenue par des étais, furent installées avec des planches et du carton bitumé des chambres hautes de 2,25 *m*, où logèrent les ouvriers.

Les figures 328 et 329 indiquent le procédé de débarquement adopté :

Eddystone (fig. 330). — On comprend aussi d'après le croquis ci-contre l'installation faite pour la construction de la nouvelle tour d'Eddystone, où l'on utilisa un vapeur construit spécialement pour l'édification des phares de *Great Basses* et *Little Basses Rock* à Ceylan.

Cette tour est la quatrième qui prend place sur le rocher d'Eddystone devant Plymouth. La première, construite par Wistanley en 1693, s'écroula en 1703 : la seconde, due à Rudyard, fut brûlée en 1755. La troisième, édifiée par le célèbre Smeaton, de 1757 à 1759, jugée trop basse et menacée par les fissures qu'a produites dans le roc le choc des vagues, a été remplacée par l'actuelle (1878-1881).

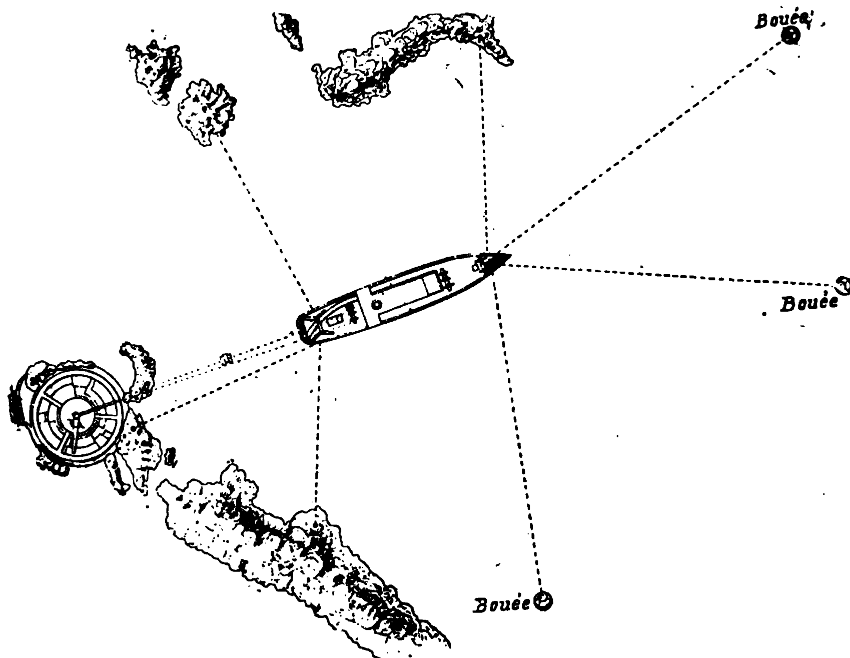


Fig. 330. — Eddystono. — Plan dos manœuvros.

La roche où s'élève la nouvelle tour est à 36 mètres de l'ancienne et à basse mer de morte eau elle est encore immergée. Sur la surface supérieure, préalablement dressée, on construisit d'abord avec des moellons ordinaires et du mortier de ciment de Portland, une plate-forme de 6,40 *m* de diamètre, noyau de la construction définitive et qui, élevée de 3 mètres au-dessus des basses mers, permettait un accostage facile. Au milieu fut dressé un mât en tôle, servant de grue pour les déchargements, et s'élevant avec la maçonnerie.

La base de la tour devant être cylindrique avec 13,50 *m* de diamètre, on établit autour du noyau primitif de maçonnerie une enceinte en briques de 2,15 *m* d'épaisseur, de même hauteur et dont le diamètre intérieur était de 13,80 *m*. Dès que le niveau du jusant arrivait à cette

hauteur, l'eau contenue dans l'enceinte était épuisée par des pompes placées dans le vapeur de service et dont les tuyaux d'aspiration en caoutchouc à spirale métallique intérieure, de 75 millimètres de diamètre, passaient sur des cordages ; on établissait alors à sec la fondation. L'enceinte était ensuite exhaussée en briques et le travail pouvait continuer.

Le premier anneau de cette enceinte était construit à basse mer de vive eau, avec du ciment romain à prise très rapide, après décapage de la roche par de l'acide sulfurique.

Voici la description des manœuvres pour le débarquement des pierres (fig. 331) :

Le vapeur est mouillé à 60 mètres environ du rocher, à l'avant par des aussières de 25 *cm* attachées à des bouées ancrées au moyen de chaînes de 40 millimètres

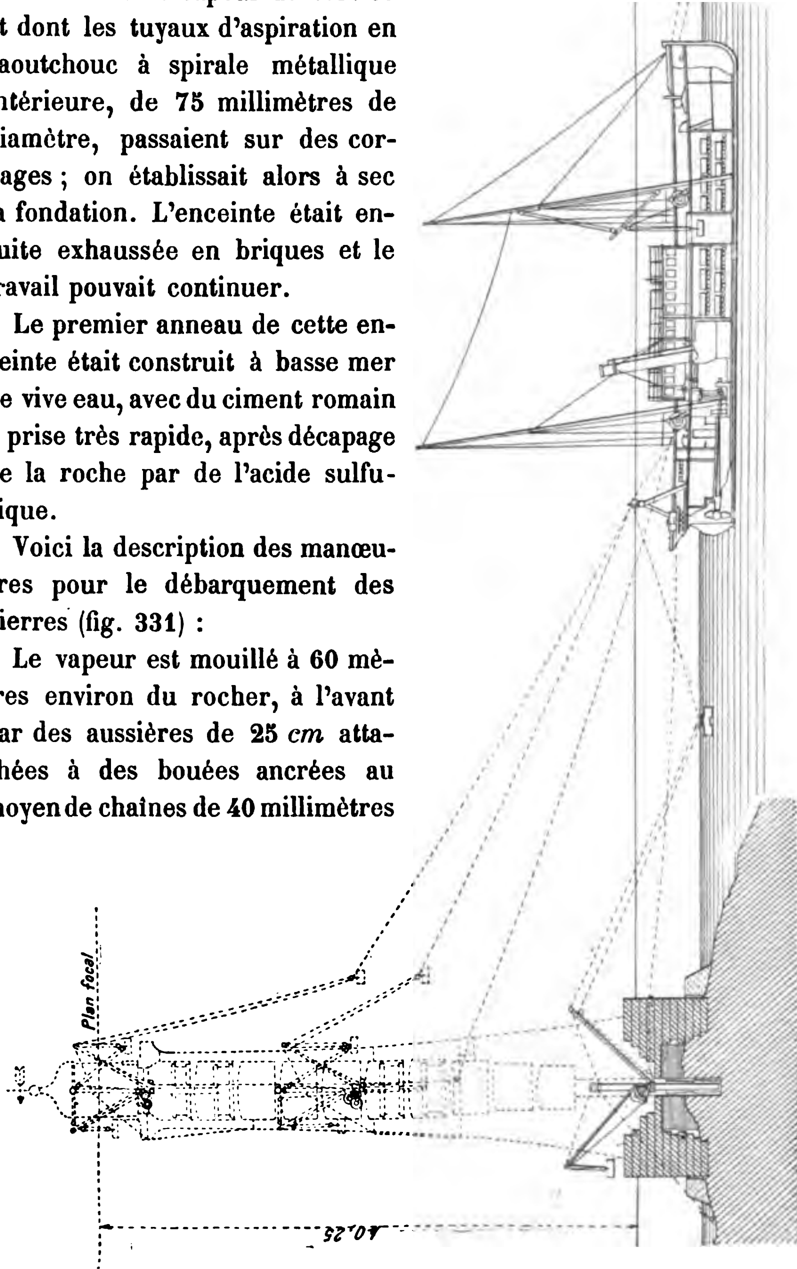


Fig. 331. — Construction du phare d'Eddystone.

et de crapauds de 2 tonnes, à l'arrière à des anneaux fixés dans le

rocher. Le bout de chaque aussière est retenu par une chaîne de décapelage, pour tout lâcher en cas de mauvais temps subit.

Un mât creux en fer, de 7,60 *m* de longueur et 40 *cm* de diamètre, est fortement coincé au centre de la tour dans un trou de 1,50 *m* de profondeur et étayé par des chaînes de 20 millimètres. Ce mât porte deux bras, l'un en bois pour débarquer les pierres, l'autre en fer capable de tourner autour du mât pour les poser.

Le bras en bois était à l'origine enlevé après chaque opération à la marée afin de le soustraire au choc des vagues ; celui de fer était seulement abaissé, amarré à des tire-fonds, tandis que son treuil était arrimé dans le trou central ou emporté à bord. A mesure de l'avancement des travaux, ces précautions devenaient inutiles; le mât était soulevé par des vérins hydrauliques ; à la fin on le surmonta d'un mât de hune pour éviter les fréquents soulèvements.

Le vapeur étant mouillé, les pierres étaient retirées de la cale et amenées à l'arrière, à l'aplomb d'un fort échafaudage en charpente, sous lequel étaient disposés des rouleaux en bois qui servaient à transporter les pierres jusqu'au bord du navire, au-dessous d'un fort échafaudage. Un treuil à vapeur à double tambour les expédiait à terre. Une chaîne de 14 millimètres, partant de l'extrémité de tribord du treuil, passait sur une poulie sur le côté de l'échafaudage, et de là successivement à deux poulies, l'une de renvoi au pied du mât de déchargement, l'autre à la tête du bras de ce mât, ensuite à une poulie à laquelle était accrochée la pierre, et enfin elle était attachée à l'extrémité de la volée. Une seconde chaîne, qui se déroulait de l'autre tambour, était fixée à la pierre. On comprend bien le reste de l'opération par la figure, où sont représentées trois positions successives de la volée.

Les pierres, pesant de $2\frac{1}{2}$ à $3\frac{1}{4}$ tonnes étaient débarquées en trois minutes au plus.

Les fondations s'élèvent généralement d'une certaine hauteur au-dessus des hautes mers ; elle est de 75 *cm* à Eddystone ; de 2 mètres au Four. Aux Grands Cardinaux, la tour commence presque à la surface du rocher lui-même.

Diamètre. — Le diamètre extérieur de la base dépend du diamètre intérieur, l'épaisseur devant assurer la solidité ; quand le rocher d'établissement n'offre que la surface strictement nécessaire, comme à Ar-

Men, on a vu que c'est au contraire du diamètre extérieur qu'il faut déduire l'intérieur.

En ce dernier phare, le diamètre des chambres varie de 3 mètres dans le bas à 3,40 *m* dans le haut ; on l'a élargi par des retraites successives.

L'épaisseur y est de 1,70 *m* au niveau de la porte d'entrée et de 80 *cm* au-dessous de la corniche de couronnement. Les épaisseurs correspondantes à Eddystone sont 2,60 *m* et 70 *cm*.

La hauteur de la tour d'Ar-Men est de 20 mètres de la porte d'entrée à la balustrade, celle d'Eddystone de 26,40 *m* dans les mêmes conditions. L'épaisseur à la hauteur de la porte d'entrée est donc à peu près la onzième partie de la hauteur. Au Four, l'épaisseur est de 2,75 *m* pour 22,70 *m* de hauteur, soit $\frac{1}{8}$.

Dimensions. — La hauteur des phares dépend du rôle auquel ils sont destinés et aussi du diamètre à la base qu'on a pu leur donner.

Voici la hauteur de diverses tours, comptée de la position du foyer au-dessus de la fondation :

L'Ile Vierge . .	75 *m*	Ar-Men . .	32 *m*
Planier	59	Dhu Heartach	36
La Coubre et Eckmühl	53	Bell Rock . .	35
La Vieille . . .	22	Eddystone .	45
Grand Charpentier	25	Skerryvore .	40

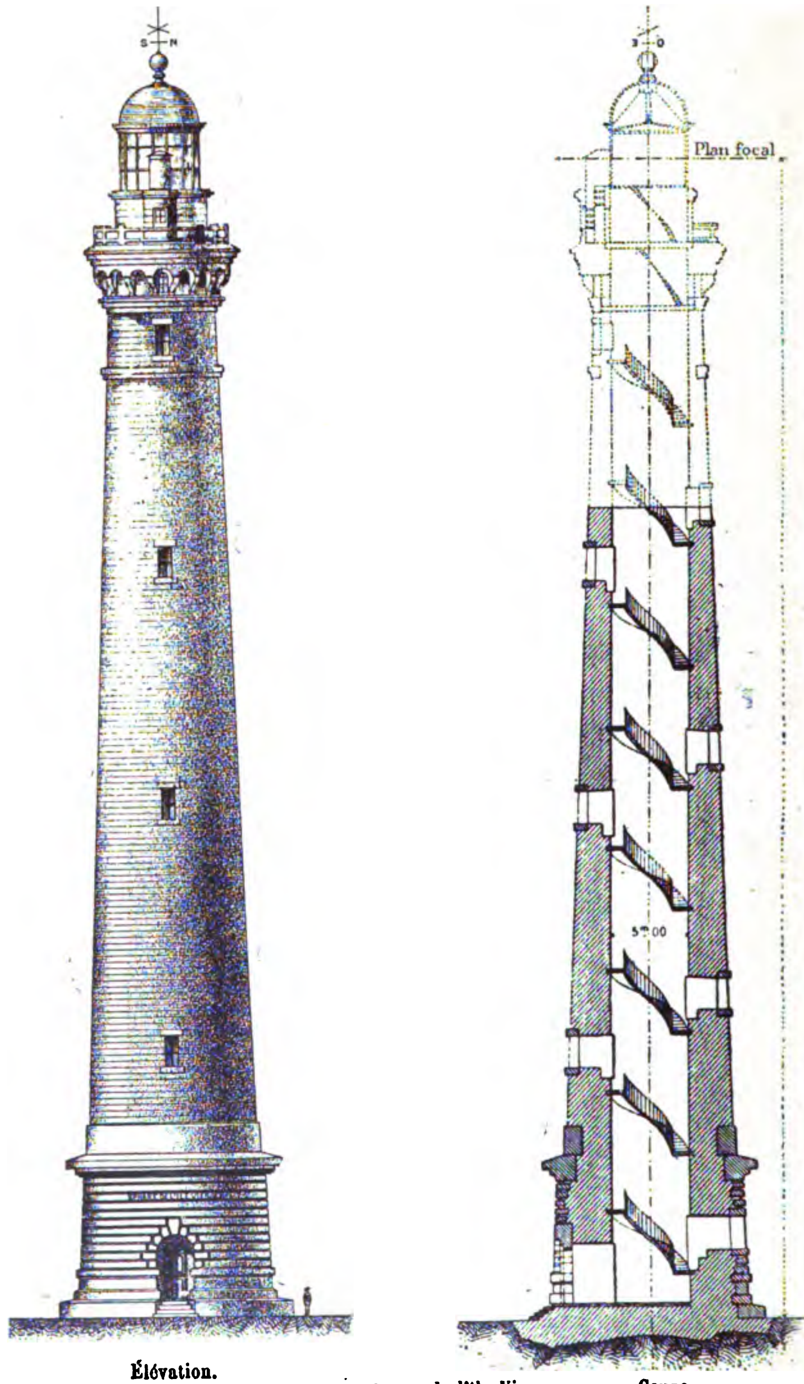
Le diamètre à la base est de :

Bell Rock. .	13 *m*	Planier . .	10 *m*
Dhu Heartach	11	La Coubre .	7,90
Eddystone .	13,50	Ar-Men . .	7
L'Ile Vierge .	11	Le Four . .	9

Ile Vierge (fig. 332). — La tour repose sur le roc nivelé par un massif de 16 mètres de diamètre. Le vide est un cylindre de 5 mètres de diamètre ; l'épaisseur des maçonneries est de 4,20 *m* à la base, 3 mètres à l'origine du fût et un mètre seulement au sommet, ce qui constitue un fruit de 1/30.

Les matériaux autres que la pierre de taille sont des moellons granitiques posés au mortier de ciment de Portland à raison de 600 à

700 kilogrammes par mètre cube dans les fondations et 450 kilo-



Élévation. Fig. 332. — Phare de l'île Vierge. Coupe.

grammes dans le fût. Une chemise intérieure en briques, isolée de la maçonnerie, constitue un obstacle à l'introduction de l'humidité. La hauteur totale dépasse 82 mètres.



Fig. 333. — Pharo de Cordouan.

Cordouan. — La figure 333 représente le phare de Cordouan à l'entrée de la Gironde, l'un des plus beaux qui aient jamais été construits.

Phares métalliques. — *Roches-Douvres.* — Un bon type est le phare de Roches-Douvres établi sur un rocher entre les îles de Bréhat et Guernesey, au milieu d'une mer toujours forte et de courants très rapides.

La roche s'élève au niveau des hautes mers. La tour métallique a été fondée sur un soubassement en maçonnerie de 2,10 *m* de hauteur. La

tour métallique a 48,30 *m* depuis son pied jusqu'au niveau de la plateforme supérieure et 56,15 *m* jusqu'au sommet de la lanterne. Le diamètre a 11,10 *m* à la base et 4 mètres au sommet. Le feu est à 53 mètres au-dessus des hautes mers.

L'escalier occupe le centre ; les magasins et logements sont distribués au pied de la tour.

L'ossature est indépendante de l'enveloppe extérieure ; elle se compose de 16 grands montants, comprenant chacun 15 panneaux sur la hauteur. Chaque panneau est formé de fers à T soigneusement assemblés ; ils se boulonnent les uns avec les autres et s'appuient sur des entretoises, sur lesquelles se posent les feuilles en tôle constituant l'enveloppe, dont les joints sont couverts par des plates-bandes en fer, et qui sont fixées par des boulons.

La plateforme supérieure repose sur les montants par des consoles.

L'escalier est en fonte avec limons en fer.

Avec ces dispositions, la solidité de la tour n'est due qu'à l'ossature et nullement à l'enveloppe extérieure, trop sujette aux détériorations. Celles-ci sont d'ailleurs évitées en partie par le soin que l'on a pris de faciliter la visite de toutes les pièces et de réduire les surfaces qui pourraient retenir l'humidité.

Les dimensions des pièces permettaient une facile manutention, et les boulons ont partout remplacé les rivets.

Ce phare fonctionne depuis 1869.

Un phare analogue a été placé à la Nouvelle-Calédonie. Il a 45 mètres de hauteur.

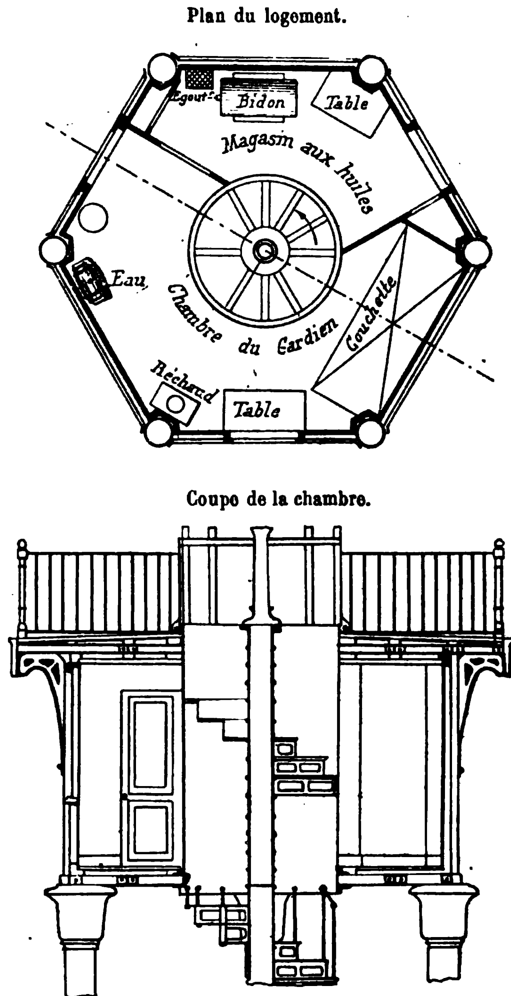
Walde. — Etabli à la laisse de basse mer, près de Calais, il se compose d'un échafaudage supportant la chambre des gardiens et la lanterne.

Il comprend sept pieux à vis, un central et six arcs-boutants inclinés à 1/4, tous reliés entre eux par des tirants obliques et horizontaux. Ces pieux se composent de deux bouts, un inférieur ayant 15 mètres de long et portant la vis Mitchell, l'autre, qui sert de rallonge, a 8 mètres ; leur diamètre est de 152 *mm*. La plateforme dépasse de 16,50 *m* le niveau de l'estran et de 6,50 *m* celui des hautes mers.

Port-Vendres. — Le phare représenté par la figure 334 est construit sur le musoir du môle de Port-Vendres, très exposé à la violence

des vagues et où une construction en maçonnerie aurait eu à craindre le tassement des matériaux.

Plan du logement.



Coupe de la chambre.

Fig. 334. — Phare métallique de Port-Vendres.

Le gardien devait être logé dans le phare, pour entretenir le feu durant les gros temps où l'accès du môle est impossible. Afin de préserver l'édifice de l'action des lames, il a été construit en métal. Le système de tirants adopté à Walde ayant été reconnu défectueux à cause du desserrage, a été remplacé par des colonnes en fers tubulaires, de 14,50 *m* de longueur, disposées en hexagone de 2,20 *m* de côté.

La partie inférieure, de 30 *cm* de diamètre, est encastrée sur deux

mètres dans un massif de maçonnerie; le sommet est assemblé avec les planchers métalliques de la plateforme. Les trois cylindres qui composent la colonne s'assemblent par des parties filetées.

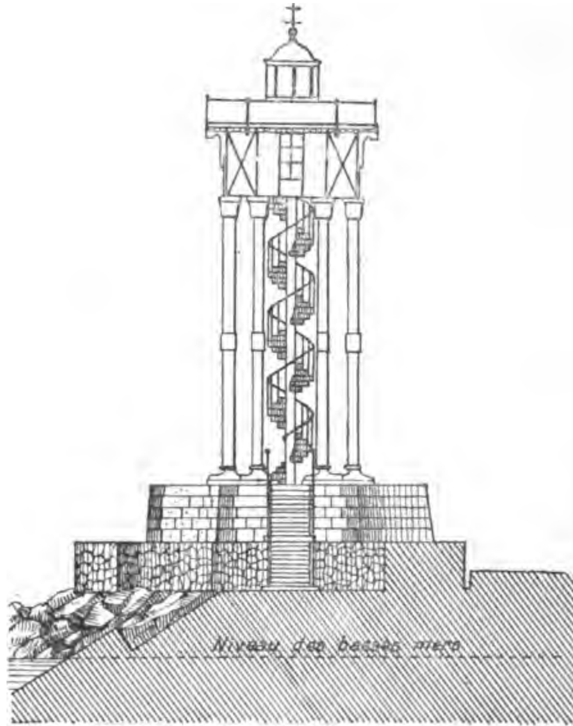


Fig. 334. — Phare métallique de Port-Vendres. — Elévation

L'accès de la chambre a lieu par un escalier à vis avec noyau tubulaire.

Le phare a supporté sans avaries les plus gros temps depuis 1884.

Phares américains. — Plusieurs phares des Etats-Unis ont été établis d'après des méthodes particulières. Nous citerons :

Stannards Rock (1877-1882) (fig. 335). — Etabli à 80 kilomètres de Marquette dans le lac Supérieur. La fondation se compose d'un cylindre en tôle épaisse de 12 millimètres, de 19 mètres de diamètre et 9 mètres de hauteur, rempli de béton et reposant sur un rocher situé à 2 mètres au-dessous de la surface.

Pour placer ce cylindre, un crib carré en charpente de 30 mètres de côté et 2 mètres de hauteur, avec un puits médian de 20 mètres de

diamètre, fut amené sur le lieu de la construction, de manière que le puits se trouvât circonscrit au cylindre futur de fondation. On releva par un millier de sondes les cotes de la surface du rocher au droit du crib qui, ramené à terre, eut les pièces de sa paroi inférieure coupées pour se modeler sur cette surface. On le remit ensuite en place, et on l'immergea en le chargeant de pierres : il avait alors une hauteur de 4 mètres.

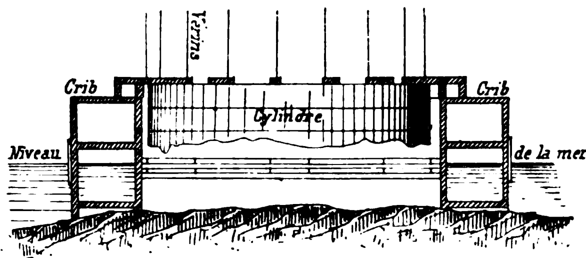
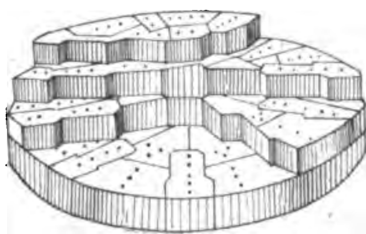


Fig. 335. — Fondation du phare des Stannards Rock.

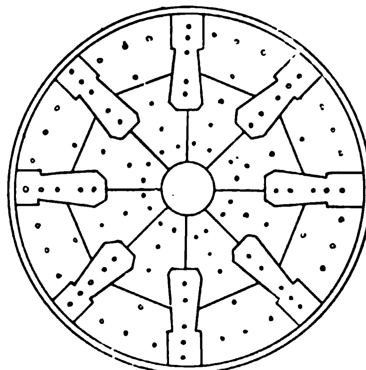
Sur le puits on suspendit par des vis une hauteur de 4,50 *m* du cylindre, dont l'arête inférieure, coupée à la forme du rocher était munie d'un bourrelet d'étoupe ; on laissa le tout reposer sur le fond et l'étoupe constitua un joint étanche. L'eau fut épuisée dans le cylindre auquel on donna sa longueur définitive et qu'on remplit de béton.

Sur cette fondation on éleva la tour en pierres de taille. Le feu est à la hauteur de 30 mètres au-dessus de l'eau.

Spectacle Reef, lac Huron (1870-1874). — Ce phare est construit à 20 kilomètres du rivage sur un écueil qui gît à 3,30 *m* sous l'eau. Les fondations ont été établies comme celles de Stannards Rock, mais le caisson, de 11 mètres de diamètre et 4,25 *m* de hauteur, était en douves de bois.



Vue perspective.



Plan.

Fig. 336. — Assises du phare de Spectacle Reef.

Sur cette fondation on a établi une tour de 24,50 *m* de hauteur, avec

9,73 *m* de diamètre à la base et 5,50 *m* à la corniche. Les pierres de taille sont, dans chaque assise horizontale, enchevêtrées (fig. 336) et d'une assise à la suivante, elles sont reliées par des goujons de 60 millimètres de diamètre et de 500 millimètres de longueur.



Fig. 337. — Phare de Craighill Channel, Baltimore.

Craighill Channel, entrée de Baltimore (1875) (fig. 337). — Ce phare se compose d'une tour métallique émergeant de l'eau et composée de deux portions remplies de béton ; l'inférieure est un tronc de cône de 3,60 *m* de hauteur dont les bases ont 9 mètres et 7,30 *m* de diamètre ; la supérieure est un cylindre ayant ce dernier diamètre ; la tôle a une épaisseur de 50 millimètres sur la hauteur qui s'étend de 60 *cm* au-dessous de la haute mer. Le reste n'a que 30 millimètres.

Le fond de la baie est vaseux : on établit sur la place de la construction un pilotis recepé à 7,30 *m* au-dessous du niveau moyen.

Sur un grillage composé de quatre rangées de pièces de 30 *cm* d'équarrissage on boulonna le tronc de cône de 3,60 *m* de hauteur et une hauteur de 5,40 *m* de la portion cylindrique de la tour, pour avoir 9 mètres de hauteur. En remplissant ce caisson d'un mètre de béton on lui donna un tirant d'eau de 4,50 *m* ; il fut alors remorqué au-dessus du pilotis, et échoué par le remplissage en béton.

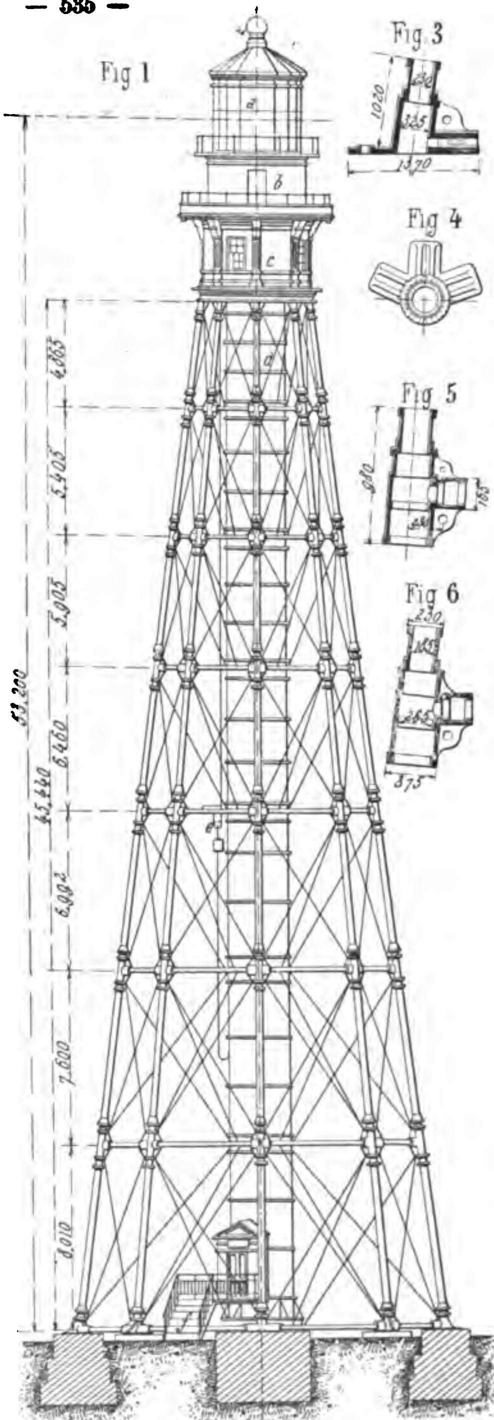


Fig. 338. — Pharo du cap Charles.

On emploie aussi beaucoup aux Etats-Unis les feux établis sur pieux à vis comme celui du cap Charles (fig. 338).

Deer Island (1889). — Ce phare est établi dans le port de Boston par 1,20 *m* de profondeur. Il a comme fondation du béton coulé sous l'eau dans un cylindre en tôle de 10 mètres de diamètre et 9 mètres de hauteur, mis en place au moyen d'une plateforme provisoire.

Le même système, mais avec un caisson hexagonal en bois a été employé à la rivière Détroit (1885).

Rothersand (fig.339 et 340). — Ce phare dont le but est de faciliter l'entrée du Weser, est établi en mer sur un banc de sable dont la crête

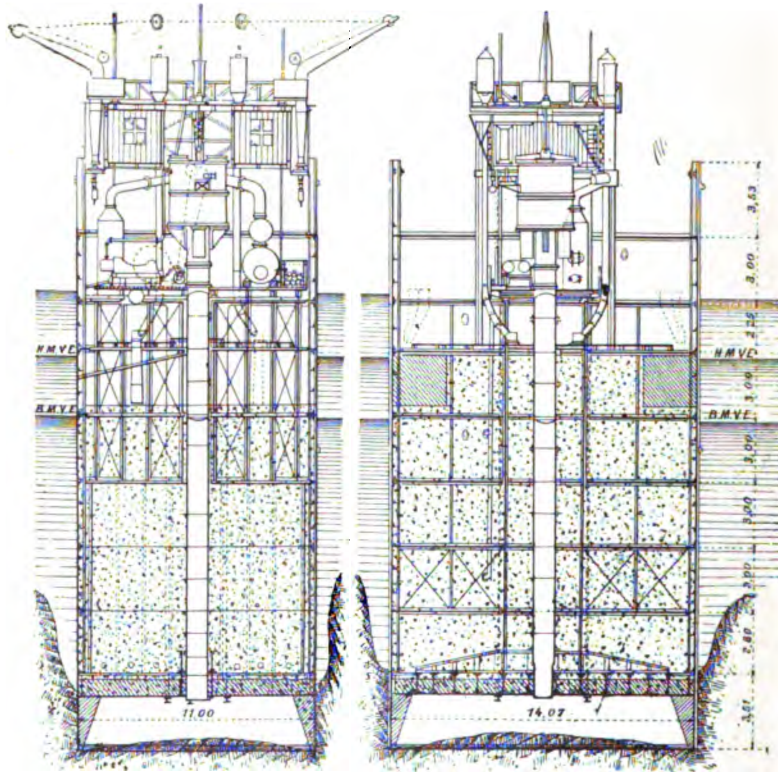


Fig. 339. — Phare de Rothersand. — Coupes verticales.

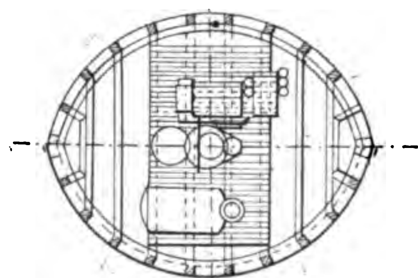
à basse mer est à 6 mètres au-dessous du niveau de l'eau; les fondations ont été descendues à 22 mètres de profondeur. Le port d'attache des approvisionnements était Bremerhaven, à 50 kilomètres.

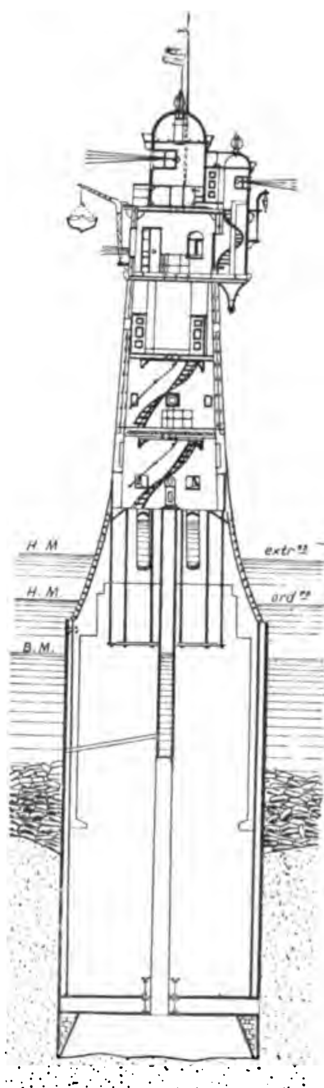
Les fondations ont été exécutées sous l'air comprimé dans un caisson

en fer, elliptique, ayant 14 et 11 mètres au grand et petit axe et 18,50 *m* de hauteur. A la chambre de travail de 2,50 *m* de hauteur on accédait par une seule cheminée d'un mètre de diamètre, munie d'un sas de 2,60 *m*.

Le caisson au-dessus de la chambre de travail était contreventé de 3 en 3 mètres par quatre plateformes; les maçonneries s'exécutaient sur l'inférieure. Les trois autres étages portaient respectivement: les machines de compression; les bureaux et magasins et enfin supérieurement deux grues à vapeur de 2 000 kilogrammes pour le déchargement des matériaux. A mesure de l'avancement des maçonneries, ces plateformes étaient soulevées de 3 mètres par des vérins.

Le caisson, monté à Bremerhaven, pesait 300 tonnes avec toutes ses machines; il fut conduit sur





Coupe horizontale. Fig. 340. — Phare de Rothersand. Coupe du phare terminé.

place par quatre remorqueurs. Il avait fallu lui ajouter latéralement deux caisses à air, de 8 × 2 × 3 mètres pour borner son tirant d'eau à 6 mètres, et aussi afin de l'empêcher de trop s'incliner sous la vague ou le vent.

Une fois en place, le caisson fut coulé par l'ouverture de deux vannes

et l'élévation des maçonneries de béton au-dessus de la chambre de travail assura l'enfoncement, tandis que le creusement à la main s'opérait dans la chambre de travail. Les parements se composent d'un mur de deux briques et demie d'épaisseur. Le voisinage du caisson était protégé contre l'affouillement par des fascines lestées de moellons.

Commencée le premier juin 1883, la fondation était terminée à un mètre au-dessus des basses mers le 22 mai 1884. Le bord supérieur du caisson, qui avait dû être exhaussé, émergeait alors de 10,50 *m* au-dessus de ce niveau, ce qui lui donnait une longueur totale de 32,50 *m*.

Les machines furent alors enlevées, la chambre de travail remplie de béton et la tour de maçonnerie exécutée à l'abri des parois; elle fut terminée en août 1885. Son diamètre est de 10,50 *m* à la base; la plateforme, élevée de 24,50 *m* a 5,10 *m* de diamètre.

En outre du feu de quatrième ordre qui se trouve dans la tourelle centrale de 3,30 *m* de diamètre, il en existe plusieurs autres, destinés à indiquer les uns la route à suivre, les autres l'approche du phare; ils ne sont en effet visibles qu'à 2 milles.

Le phare a été allumé le premier novembre 1885.

Phare de Raz-Tina. — Ce phare établi devant Sfax en Tunisie est porté par une tour de 44 mètres construite entièrement en béton, à cause de la rareté de moellons convenables. Comme cette raison, ainsi que le manque de bons maçons, peut décider l'emploi du même système de construction, nous le décrirons avec quelques détails.

A cause des dimensions de l'appareil, le diamètre intérieur fut fixé à 1,80 *m*; on adopta par prudence une épaisseur minima de 70 *cm*, et le profil fut exécuté de façon à maintenir à toute hauteur dans la maçonnerie une pression de 3 kilogrammes par centimètre carré (en comptant le poids de l'appareil; la densité du béton étant estimée 2 100 kilogrammes). Le diamètre augmenta donc, de la plateforme aux fondations, de 3,20 à 8,50 *m*. L'action du vent, calculée à 250 kilogrammes par mètre carré de la section, laissait 6 comme coefficient de sécurité, et provoquait une pression totale de 4,6 *kg* par centimètre au point le plus chargé de la base.

Escalier : Vide central de 40 *cm* de diamètre; pas 5,75 *m*. Marches: hauteur 18 *cm*; largeur 22 *cm* à la ligne de foulée; longueur libre 70 *cm*; encastrement dans la maçonnerie 25 *cm*; exécutées en béton.

Fondations : Parallélipipède à base carrée de 12 mètres de côté et 2,50 *m* de hauteur, surmonté d'un tronc de pyramide de 1,50 *m* de hauteur et ayant 10 mètres au côté de la base supérieure. La forme carrée a l'avantage de l'étaiement facile de la fouille.

Bâtiments. — A cause de l'exiguité de l'espace sur le monticule où s'élève le phare, ils furent groupés contre la tour, en ne laissant libre que le côté de la mer. Ils comprennent, outre les pièces indispensables au service, deux logements de gardiens européens, et un de gardien indigène.

Les eaux de pluie, seule eau potable, sont recueillies dans deux citernes.

Construction de la tour. — Elle a été élevée par anneaux de 1,08 *m* de hauteur, correspondant à six marches de l'escalier, entre des moules concentriques ; il y avait donc entre chaque anneau des redans, qu'on a remplis par un placage en béton recouvert d'un enduit. L'avancement moyen a été d'un demi-anneau par jour.

Les ouvriers accédaient au sommet par un léger échafaudage extérieur ; le béton était hissé dans des bennes mues par des treuils à bras.

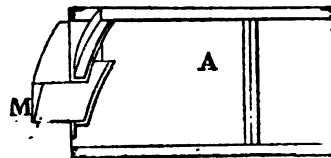


Fig. 341.

Moule intérieur (fig. 341). — Formé d'un cylindre A en tôle (diamètre 1,80 *m*, hauteur 1,08 *m*), découpé en trois pièces se raccordant par des boulons ; une des découpures était suivant une génératrice ; les deux autres étaient inclinées pour la facilité du démontage.

A la paroi extérieure du cylindre était boulonné un manchon M en tôle formant un bourrelet héliçoïdal à section rectangulaire, destiné à laisser dans la paroi intérieure de la tour l'empreinte du pas de vis V dans lequel devaient être encastrées les marches de l'escalier. Ce manchon se déboulonnait de l'intérieur du moule.

Dans le haut de la tour, où l'on n'avait plus assez d'espace pour bien bourrer le béton sous le manchon, on l'enlevait et l'on donnait, en le vérifiant au gabarit, la face inférieure du pas de vis ; on remettait le manchon en place et l'on achevait le damage.

Chaque moule était placé sur le moule de l'anneau précédent, que l'on n'enlevait qu'après.

Moule extérieur (fig. 342). — Il se composait de planchettes verticales P jointives, de 1,08 *m* de longueur, retenues par des crochets *f* et *g*

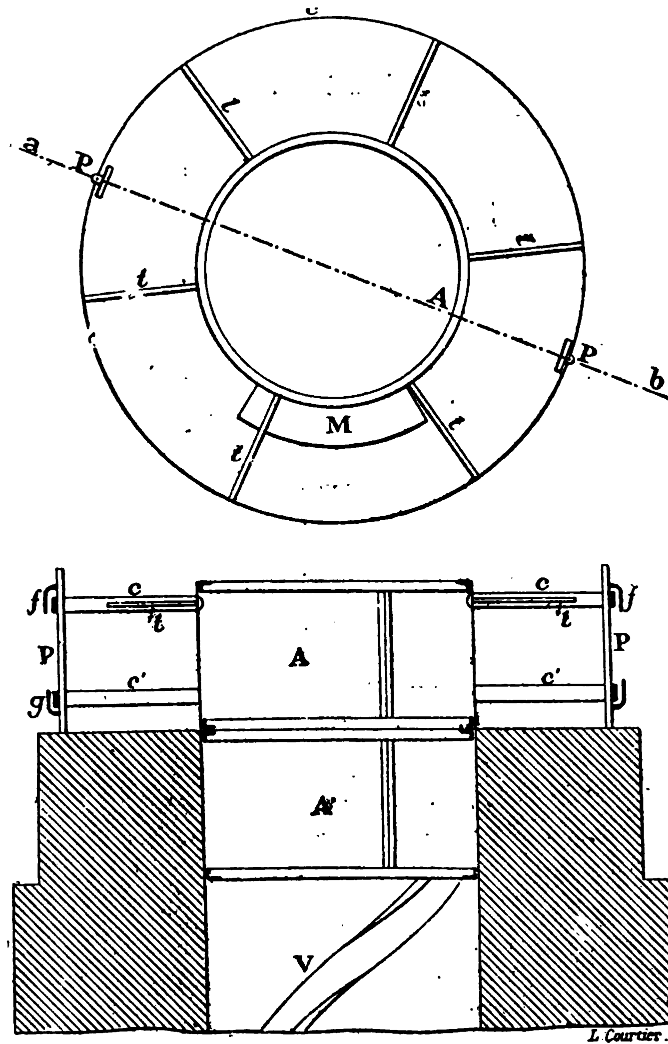


Fig. 342.

entre deux cercles *c* et *c'* en fer plat. On posait d'abord le cercle *c*, on le boulonnait en lui donnant la forme voulue par six tirants horizontaux en fer rond, appuyés sur le moule intérieur ; le boulonnage se faisait exactement dans un des nombreux trous pratiqués sur les extrémités du cercle.

Bétonnage. — Le bétonnage se faisait par couches de **20** *cm* d'épaisseur; on ne démoulait qu'après six jours; il fallait donc trois jeux de moules. Aussitôt après le démoulage on encastrait les marches de l'escalier.

Affaissement. — Les fondations se sont affaissées régulièrement de **14** *cm*; au cas où l'affaissement ne se fût pas opéré horizontalement, on avait tout préparé pour consolider le terrain par des pilots ou par une reprise en sous-œuvre par des galeries pratiquées dans le monticule.

Le mortier employé était à la chaux du Teil.

Bishop-Rock. — Un travail d'une difficulté exceptionnelle a été exécuté de 1883 à 1887 au phare de Bishop-Rock ; on a consolidé et élevé l'ancienne tour construite en 1858. La figure 343 indique le procédé suivi :

L'édifice a été entouré d'un revêtement de pierres de taille à queues d'aronde horizontales et verticales, depuis la fondation jusqu'à la hauteur de l'ancienne chambre de service ; au-dessus, la vieille maçonnerie a été détruite et la tour surélevée de **11** mètres,

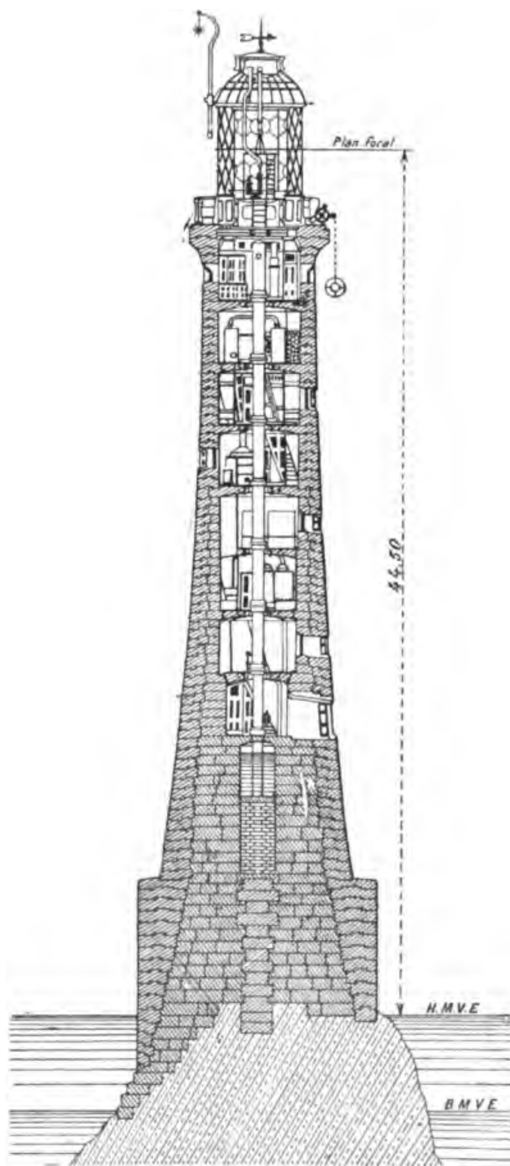


Fig. 343. — Pharo do Bishop-Rock.

donnant l'espace nécessaire pour quatre nouvelles pièces, et augmentant de 4 kilomètres la portée du feu.

Les nouvelles pierres de taille, finies et montées d'abord à faux frais à terre, sont reliées par un tenon de 15 *cm* avec le parement de la vieille tour; elles sont de même réunies entre elles. Posées au mortier de Portland avec poids égal de sable, elles reçoivent de plus des goujons de 40 *mm* de diamètre qui les maintiennent pendant la prise du mortier. Les assises consécutives sont à joints croisés.

La base de 12,50 *m* de diamètre est cylindrique sur une hauteur égale. Elle se termine par une plateforme qui sert de débarcadère pour les approvisionnements durant les mauvais temps. Au-dessus, la tour s'élève avec un profil elliptique.

Le poids des blocs varie de 2 000 à 3 500 kilogrammes.

La pierre était débarquée par le treuil à double tambour de l'arrière.

Une chaîne de 15 *mm* de diamètre partant de l'extrémité de tribord du treuil passe successivement dans trois poulies fixées : l'une sur le côté de l'échafaudage, la seconde au pied du bras en bois, la troisième à la griffe qui porte la pierre; elle va enfin s'attacher à la tête du même bras. Une seconde chaîne, de 16 *mm*, va du tambour de bâbord du treuil à une forte poulie amarrée au haut de l'échafaudage et de là à la griffe. La manœuvre pour envoyer la pierre à terre est aisée à comprendre.

Pour la déposer sur la tour, un palan volant est attaché à l'extrémité du mât, à 3 mètres au-dessus du sommet de la maçonnerie. La pierre arrivée à l'aplomb du mur, on arrête le treuil, le palan volant est accroché à l'élingue de la pierre qui est déposée sur un matelas de basting.

L'opération dure environ trois minutes.

BALISES

On appelle ainsi des ouvrages destinés à signaler les écueils sous-marins. Ce sont parfois seulement des gaules en fer et même en bois. Sur le rocher d'Antioche, une carcasse pyramidale en fer rond de 15 *cm* supporte un voyant en feuilles de tôle placé à 10 mètres au-dessus des hautes mers.

Les constructions intéressantes pour l'ingénieur sont celles en maçonnerie qui présentent des difficultés particulières d'installation : on les appelle des tours-balises à cause de leur forme.

Tour-balise de Lavezzi. — Destinée à signaler le rocher sur lequel a péri la *Sémillante*, dans le détroit de Bonifacio. Cet écueil est formé à sa partie supérieure d'un plateau incliné de 6,50 *m* de largeur, et dont les cotes de profondeur varient entre — 2,30 *m* et — 6 mètres; autour, la mer est souvent très violente et les courants énergiques.

La fondation est formée d'un massif cylindrique en béton de ciment, de 6,50 *m* de diamètre, arasé à 1 mètre au-dessus des mers moyennes; plus haut, la tour effecte la forme d'un tronc de cône de 6 mètres de hauteur, dont les bases ont 5,30 *m* et 4 mètres de diamètre.

L'adhérence de la tour au rocher a été augmentée au moyen de douze goujons en fer; les quatre les plus centraux ont 10 *cm* de diamètre et sont enterrés de 60 *cm*; les huit autres, de 15 *cm* de diamètre, pénètrent à 1 mètre.

Tous les préparatifs eurent lieu sur l'île de Lavezzi, à 1800 mètres de l'écueil.

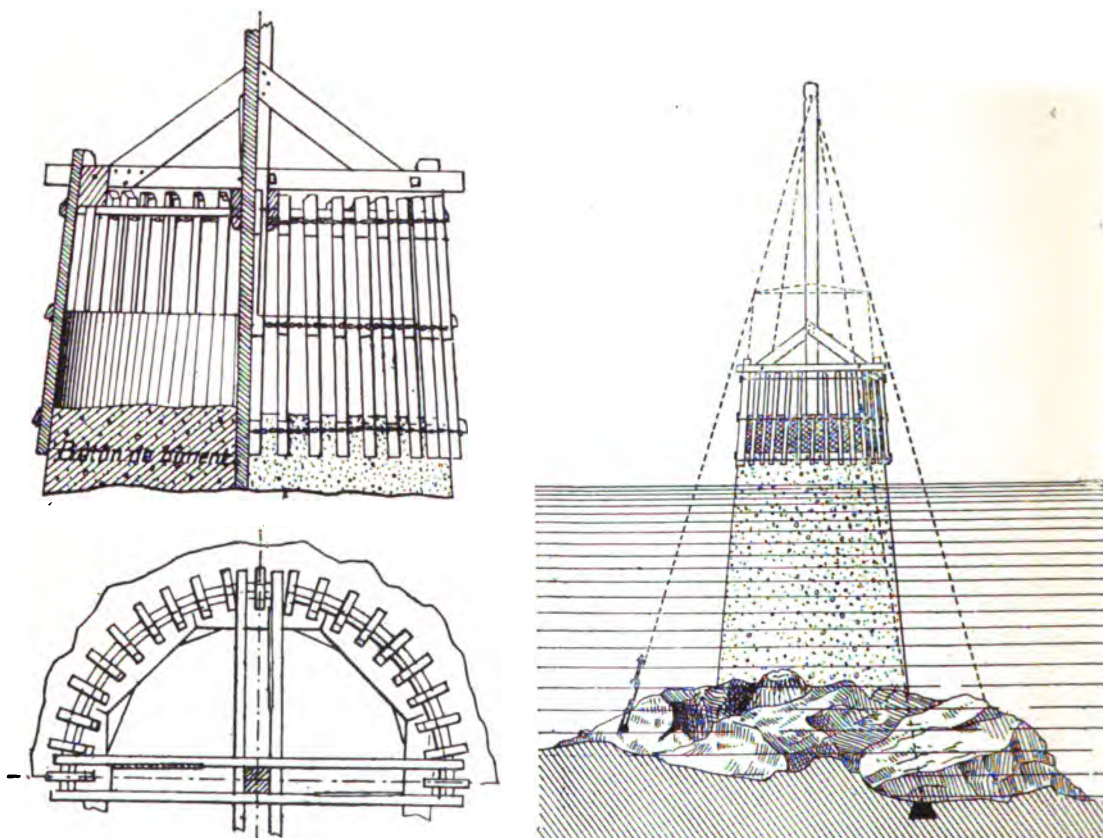
Le béton fut coulé autour d'une barre verticale indiquant le centre de la construction. Il était descendu dans des seaux au plongeur qui les vidait et tassait la matière. Les douze vides nécessaires aux goujons étaient ménagés par des tubes en fonte.

Le béton variait suivant la portion du massif à élever; extérieurement, le ciment était employé quelquefois pur; au centre, on mélangeait des volumes égaux de ciment, de sable et de pierres. Il était déposé à l'abri d'un panneau mobile de 60 *cm* de hauteur, et dont la longueur totale était du cinquième de la circonférence.

Le massif, arasé à 1 mètre au-dessus de l'eau, comprend, avec un contrefort, 177 mètres cubes; la tour supérieure comprend 113 mètres cubes.

Tour-balise de Soulard, aux abords extérieurs de la rade de Lorient. On a imaginé là un système avantageux; il consiste à couler le béton dans un moule économique et léger quoique solide, rapidement montable et démontable. Il est formé de couchis reposant sur la maçonnerie déjà faite et sur un gabarit circulaire en planches, représentant la section correspondante de la tourelle. Ce gabarit est porté au moyen de deux paires de moises en croix, par un mât vertical installé dans l'axe de l'ouvrage et solidement maintenu par des chaînes. On serre les couchis contre la maçonnerie et le gabarit par trois ceintures de chaînes, on garnit la partie intérieure de tôle galvanisée et l'on coule

le béton à l'abri de cette protection. On enlève le tout en desserrant les moises et l'on recommence plus haut sur un nouveau gabarit (fig. 344).



Demi-coupe, demi-élévation, Coupe horizontale du moule. Construction de la tour.

Fig. 344. — Tour balise du Soulard.

Le béton comprenait 3 volumes de cailloux pour 2 de mortier contenant 500 kilogrammes de ciment de Portland au mètre cube.

Tour-balise des Trois-Pierres. — Etablie à l'entrée de la rade de Lorient; ses fondations sont à la cote — 2 mètres sur un rocher qu'on a du débarrasser d'abord d'une épaisse végétation; les goemons étant coupés par des scaphandres, leurs racines ont été brûlées en brisant des touques d'acide chlorhydrique; enfin la pierre a été décapée par des grattes et des brosses.

L'axe de la tourelle a été indiquée par un mât maintenu vertical par des sacs de béton formant maçonnerie d'un mètre d'épaisseur et repo-

sant sur des croix de fer méplat fixés à un tube en tôle enveloppant la base du mât.

La première assise de la fondation a 9,40 *m* de diamètre; elle a été délimitée par des sacs de béton (11 au mètre cube) formant une enceinte circulaire dont le vide intérieur avait 7,40 *m* de diamètre. Dans ce vide dont la profondeur était de 1,35 *m*, on a coulé du béton.

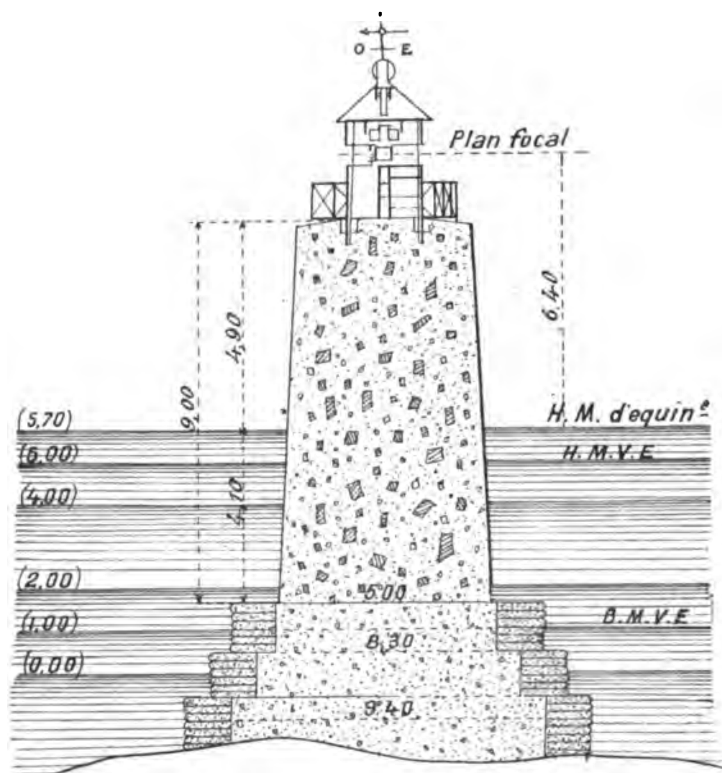


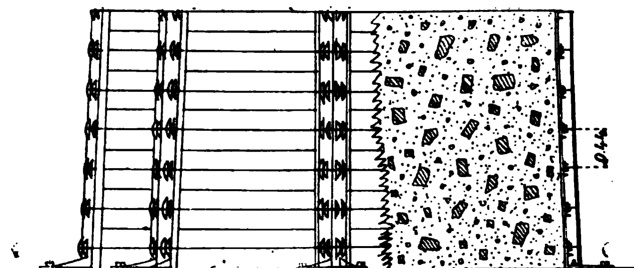
Fig. 345. — Tour-balise des Trois-Pierres.

La régularité de l'enceinte a été obtenue par un procédé très simple; un scaphandrier portait une ceinture à laquelle était fixée une tige de bois dont l'autre extrémité se rattachait à un anneau enfilé dans le mât, auquel l'ouvrier tournait le dos; il n'avait qu'à recevoir le sac de béton descendu dans une benne dont il ouvrait le fond mobile, et à le placer toujours à la même distance de son corps.

Le béton composé de gravier mélangé de sable avec 500 kilogrammes de ciment par mètre cube était fabriqué dans un chaland mouillé sur

quatre bouées ancrées d'avance aux sommets d'un carré dont la balise occupait le centre.

On a ainsi posé successivement trois assises de fondations, dont les diamètres étaient 9,40 *m*, 8,30 *m* et 7,20 *m*. On arrivait à la cote + 1,60 *m*. La tourelle a été ensuite construite à la marée, en béton mélangé de moellons, au moyen d'un coffrage démontable (fig. 346).



Coupe verticale.

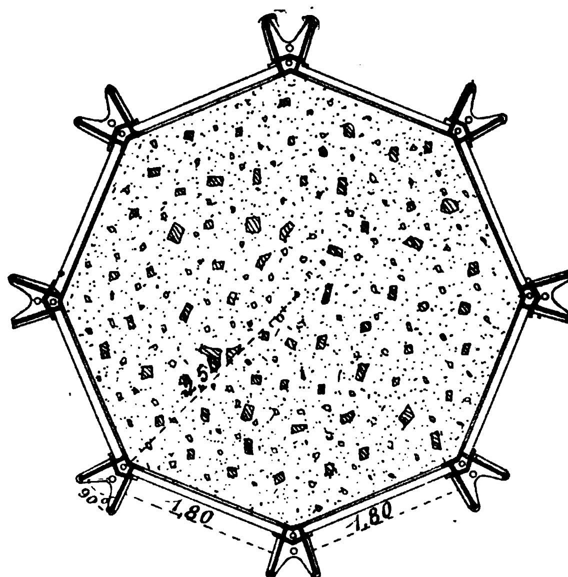


Fig. 346. — Tour-balise des Trois-Pierres. — Coffrage, plan.

Ce coffrage se compose de madriers juxtaposés de champ horizontalement, et réunis par huit arêtiers en fonte, placés aux sommets de la tourelle, qui est donc octogonale. Ces arêtiers (fig. 347) n'ont que 44 *cm* de hauteur, pour recevoir deux madriers, et se réunissent les uns aux autres, pour former la hauteur totale, au moyen de trois boulons; chaque arêtier ne pèse qu'une soixantaine de kilogrammes.

On n'élève ainsi la maçonnerie que peu à peu sans être gêné. La mise en place des arêtiers inférieurs demande une grande précision, car elle détermine l'inclinaison de la tourelle.

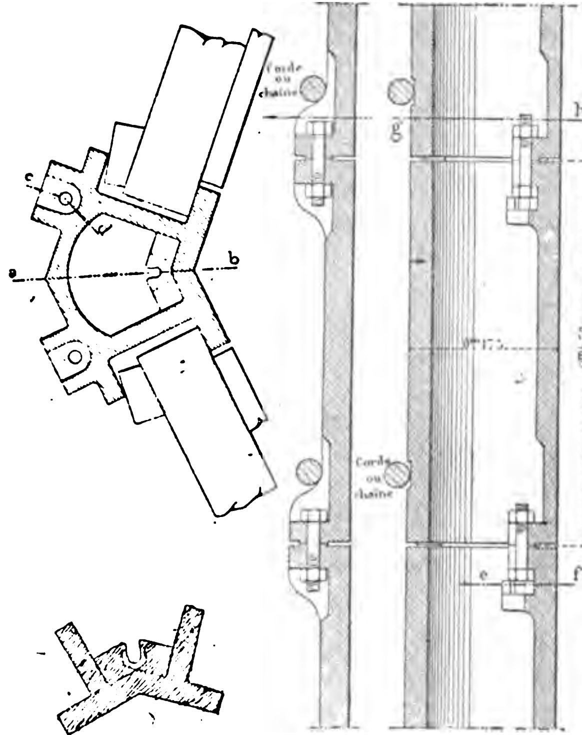


Fig. 347. — Tour-balise pes Trois-Pierres. — Détails des arêtiers du coffrage.

Le travail a duré trois étés et a coûté 33000 francs. Le mètre cube de béton est revenu à 84,60 *fr* dans les fondations, et à 94,30 *fr* dans la tourelle; ce dernier prix est supérieur à cause de la sujétion du travail à la marée.

Nouvelles tours-balises. — Les coffrages à sections octogonales recevaient d'abord du béton ordinaire; peu à peu la proportion de ciment de Portland a été augmentée; puis on a substitué au béton le mortier seul, enfin le ciment de Portland gâché pur avec le cinquième de son volume d'eau.

Le ciment pur résiste mieux à l'action de la mer et est économique au point de vue de l'accélération du travail.

Le seul inconvénient qu'il présente est sa légèreté, car la maçon-

nerie qu'il fournit ne pèse guère que 2000 kilogrammes ; on y remédie en noyant au centre de la masse des moellons granitiques ou des riblons de fonte.

De plus, le volume des tours-balises a été augmenté afin de présenter plus de résistance. Cette augmentation de volume, contrairement aux idées admises jusqu'ici, a été demandée en France, quand il a été impossible d'élargir la section par suite de l'étroitesse du roc de fondation, à l'accroissement de la hauteur qui a atteint jusqu'à 10 à 11 mètres au-dessus des plus hautes mers (Tourelles de la Horaine, des Vieux Moines et de la Grande-Vinotière).

Fondations coulées sous l'eau. — On n'avait jusqu'à ces dernières années tenté que dans la Méditerranée (Lavezzi) d'établir des balises sur des roches immergées en basse mer. Leur construction a été rendue possible dans l'Océan par l'emploi du ciment pur.

Les matières coulées l'ont d'abord été dans des enceintes en sacs de béton. Les sacs superposés formaient un anneau du diamètre voulu, épais et haut d'un mètre. Le milieu était rempli de béton coulé *in situ*; un nouvel anneau en retrait était construit et ainsi de suite.

Dans les derniers travaux, les enceintes ont été constituées par des toiles métalliques maintenues sur de légères ossatures qui offrent de nombreux avantages pour la pose, et présentent encore celui de l'évacuation facile de la laitance, dont la production est d'ailleurs diminuée par l'emploi de béton éventé après un séjour de deux mois en magasin.

Le ciment de Portland pur est coulé en poudre au moyen de bétonnières en toile d'une contenance de 250 kilogrammes dont la partie supérieure est bouchée de nombreux trous bouchés avec de la toile métallique par où s'opère l'entrée de l'eau d'imbibition de la poudre. La partie inférieure est fermée par une ligature qui est retirée à volonté.

Les massifs de fondation ainsi constitués sont beaucoup plus homogènes et résistants que les anciens.

C'est de cette façon qu'ont été construites les tourelles de la Horaine et de la Grande-Vinotière.

La première (fig. 348) située à trois milles au NO de l'île de Bréhat sur un écueil couvert de 4,40 *m* d'eau à basse mer (amplitude : 12 mètres) a 17,30 *m* de hauteur totale et se compose de deux troncs de cône superposés ayant respectivement 5,70 *m* et 4 mètres de diamètre à la

base avec 1/10 et 1/20 de fruit; leur plan de séparation se trouve au niveau des plus hautes mers.

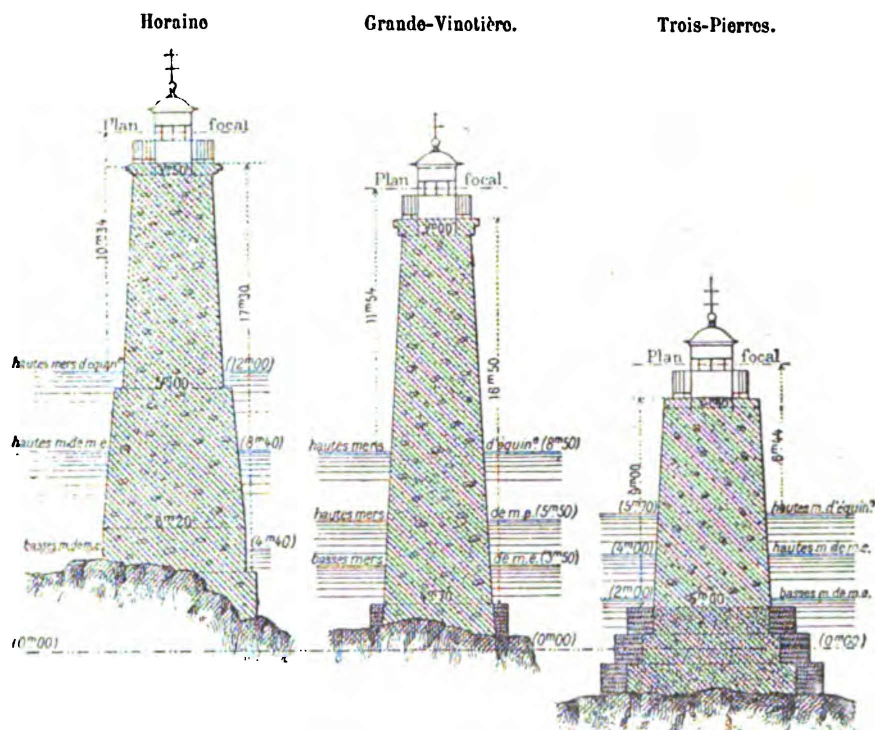


Fig. 348.

La seconde, de 16,50 *m* de hauteur a 4,70 *m* de diamètre à la base avec 1/20 de fruit. Elle se trouve dans le chenal du Four.

Le prix du mètre cube a été 92 francs à la Horaine et 151 francs à la Grande-Vinotière.

Rochebonne. — Le plateau de Rochebonne est situé à 40 milles dans l'ouest de l'île de Ré. On y construit actuellement la tourelle d'un feu fixe par le coulage de ciment en poudre, effectué d'une gabare mouillée au-dessus de la roche, immergée de 8 mètres à basse mer.

On a d'abord fixé, pour servir d'axe au massif de fondation, une balise en métal, au moyen d'un bloc coulé en poudre de ciment dans une enceinte cylindrique en toile métallique, de 2,60 *m* de diamètre et d'un mètre de hauteur.

Un casier en toile métallique annulaire a été alors descendu, dont les bords s'appliquent sur la surface supérieure du bloc. Son diamètre

extérieur est de 7 mètres, l'intérieur de 3 mètres; il est divisé en six parties par des panneaux rayonnants où l'on coule le ciment en poudre.

Éclairage des tours-balises. — On peut éclairer les balises au moyen des appareils Pintsch, employés pour les bouées lumineuses, mais ce procédé impose des sujétions qui, acceptables pour les bouées où l'on n'a pas encore de procédés meilleurs et partout applicables, peuvent être évitées à terre.

Sur l'écueil de las Puercas, à Cadix, on a installé une lanterne électrique alimentée par le courant de batteries Daniell; mais on n'a obtenu qu'une faible lumière, ce à quoi il est d'ailleurs facile de remédier. Il n'existe pourtant pas d'autre exemple d'éclairage électrique des balises.

En France, on a essayé la gazoline, contenue dans des réservoirs, que les gardiens n'ont besoin de remplir que tous les trois mois, en même

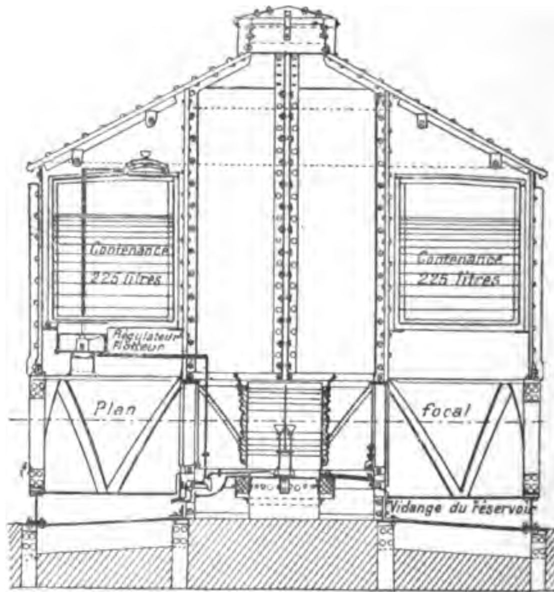


Fig. 349. — Eclairage à la gazoline d'une tour-balise.

temps qu'ils chargent les brûleurs (fig. 349). La gazoline employée pesait 670 grammes le litre. L'appareil coûtait 7 000 francs et les frais d'entretien annuels étaient de 1 000 francs. On en a installé à Lavardin (île de Ré), aux Chiens-Perrins (île d'Yeu) et au Menhir, devant Penmarch.

Mais dans les installations récentes on a préféré l'huile minérale ordinaire (Le Palais, Saint-Waast, Morées (Saint Nazaire). Les appareils brûlent plus de deux mois sans renouvellement.

Feux permanents. — En France, les tours-balises sont aujourd'hui éclairées par de petits feux à une mèche, alimentés à l'huile minérale ordinaire et fonctionnant plusieurs mois sans gardien. Sur la mèche est déposée une couche de goudron carbonisé, grâce à laquelle la vaporisation de l'huile se fait latéralement et dure longtemps.

Ces feux permanents (fig. 350) sont disposés dans des lanternes à ventilation spéciale, obtenue en installant de larges admissions d'air à leur base et des revêtements intérieurs en bois ou en toiles incombustibles, destinés à intercepter la chaleur rayonnante. On prévient ainsi la formation de la buée et du givre.

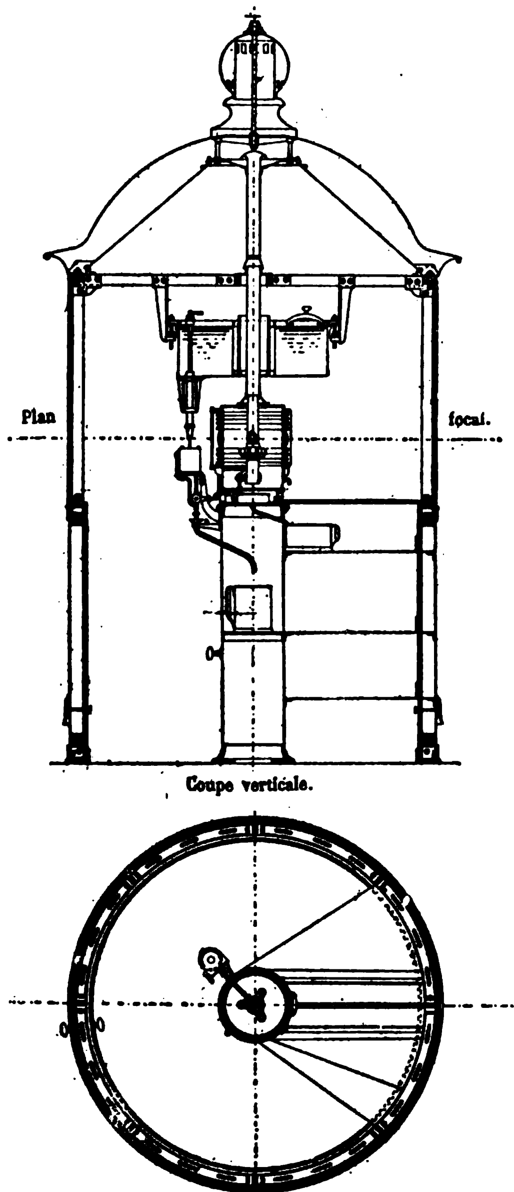


Fig. 350. — Feux permanents.

Balise lumineuse. — L'extrémité du môle Carnot, à Boulogne, est très exposée aux paquets de mer, qui s'y élèvent à trente-cinq mètres

de hauteur. Le feu qui signale le musoir ne pouvait donc être confié à un gardien et on y a disposé une balise lumineuse, placée à 15,60 *m* au-dessus des hautes mers moyennes. Elle est constituée par un réservoir cylindrique en tôle d'acier de 10 millimètres ayant 1,15 *m* de diamètre, 4,60 *m* de hauteur et 4,5 m^3 de capacité. Le gaz d'huile y est comprimé à 6 kilogrammes. L'intensité en service courant est de 10 carcels.

Le chargement est opéré par un accumulateur de 5,500 m^3 de capacité, construit comme le réservoir de la balise.

A Bilbao, les extrémités des deux môles en construction sont indiquées par des bouées lumineuses, blanches sur le môle extérieur et rouges sur l'autre. Elles sont alimentées au gaz d'huile produit dans une petite fabrique spéciale. Le gaz s'accumule à onze atmosphères dans trois récipients portés par une gabare qui va charger successivement les bouées à sept atmosphères, au moyen d'un tube flexible.

Le gaz brûle constamment et la provision suffit pour plus de cinquante jours. Par an la fabrique fonctionne neuf fois durant trois à quatre jours.

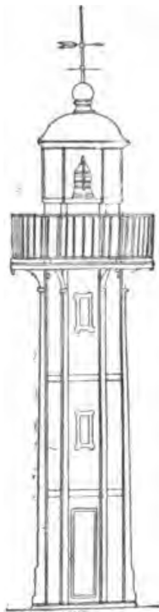


Fig. 351
Modèle de tourelle pour feu de port.

Feux de port. — Ils sont portés par de simples tourelles en maçonnerie ou en métal (fig. 351) ou par des charpentes métalliques adossées à des cabanes en tôle, logement du gardien. Des mâts en tôle sont souvent usités; à la partie supérieure une console porte la poulie destinée à l'élévation de la lanterne.

La figure 352 représente l'installation d'Isigny et la figure 352 *bis* un fanal employé pour ces feux secondaires.

Il est bien entendu que, suivant les cas, toute solution est acceptable pour les supports. Mais chaque fois que la dépense peut être acceptée, il faut faciliter le mode d'accès de la lanterne.

FEUX FLOTTANTS

Les feux flottants sont employés soit comme indicateurs d'atterrissage comme un phare, soit pour signaler un danger, un banc, soit enfin pour baliser un chenal ou l'accès d'une rade. Aujourd'hui en France,

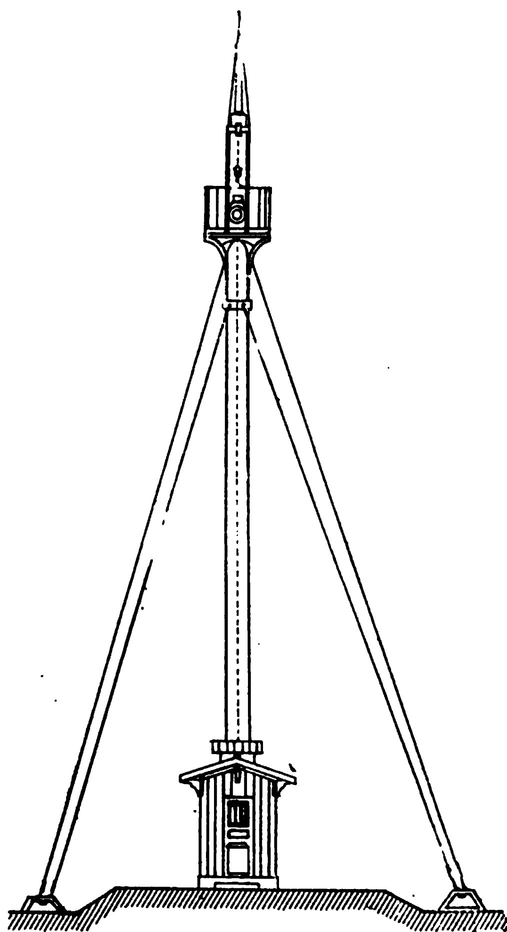


Fig. 352. — Fanal d'Isigny.

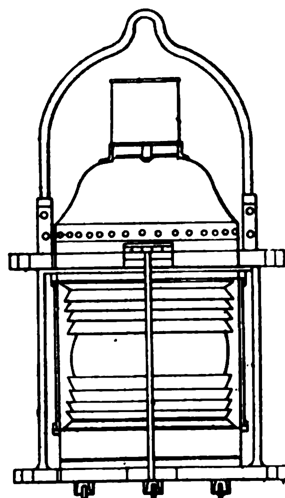


Fig. 352 *bis*. — Fanal.

les bateaux-feux sont réservés au premier rôle et il n'en existe plus que quelques-uns, surtout à Dunkerque. Dans tous les autres cas, on emploie les bouées lumineuses, moins coûteuses et qui par conséquent peuvent être multipliées. Il y en a plus de cent sur les côtes. Ces bouées sont à queue ; elles sont munies de fanaux avec lentilles de 20 à 30 *cm* de diamètre. La consommation est de 20 à 30 litres de gaz ordinaire

comprimé à six atmosphères (Minquiers, rade de Dunkerque, chenal de la Seine, entrées de la Seine, de la Loire, de la Gironde, etc.).

Ruytingen (fig. 353). — Après de nombreuses recherches, on a reconnu que la stabilité des bateaux-phares pouvait être obtenue avec les formes ordinaires. Le *Ruytingen* a les caractéristiques suivantes :

Longueur entre perpendiculaires.	30 *m*.
Largeur au plat-bord du pont	7,80 —
— à la flottaison	7,55 —
Creux	4,20 —
Déplacement en charge.	340 tonnes.

La hauteur métacentrique est de 85 *cm*. Le navire est fortement lesté latéralement ; il possède trois quilles : une centrale de 1 mètre de hauteur, deux latérales de 70 *cm*, constituées par de la tôle bordée de cornières et appuyée de mètre en mètre par des taquets métalliques.

La stabilité est déterminée de façon que les oscillations du tangage et du roulis ne peuvent être synchrones à celles des vagues. La durée de roulis est doublée et l'amplitude réduite de moitié.

Le bateau est mouillé par 20 mètres d'eau ; l'amplitude maxima du roulis a été de 40° ; la coque en acier est divisée en cinq compartiments étanches.

Le mât est un tube en tôle d'acier de 8 millimètres ; il a 18 mètres de longueur et 46 *cm* de diamètre ; la lanterne se hisse par un treuil ; l'enveloppe est constituée par un cylindre de 2,45 *m* de diamètre, en tôle d'acier de 3 millimètres dans la partie inférieure et en glaces courbes dans le haut ; la hauteur totale est de 3,25 *m* : elle embrasse le mât par un manchon cylindrique en tôle roulant sur des galets.

L'appareil d'éclairage se compose de trois photophores réunis dans un même plan vertical ; chacun d'eux a 50 *cm* de diamètre avec lampes à deux mèches. La puissance est de 1 200 becs carcels.

Le navire est mouillé sur une ancre à champignon pesant deux tonnes ; la chaîne, de 40 millimètres, est longue de 300 mètres, dont 250 mouillés ; pour éviter les *coques* on place des émerillons tous les 50 mètres, et à chaque basse-mer de vive eau on vire la chaîne à pic pour la redresser et la visiter.

Le bateau est muni d'une sirène qui fonctionne pendant les brouil-

lards. L'air est comprimé par deux compresseurs actionnés par des moteurs à air chaud de 9 chevaux chacun, qu'on met en marche en une demi-heure. Par seconde de son le débit d'air est de 160 litres (sous la pression atmosphérique).

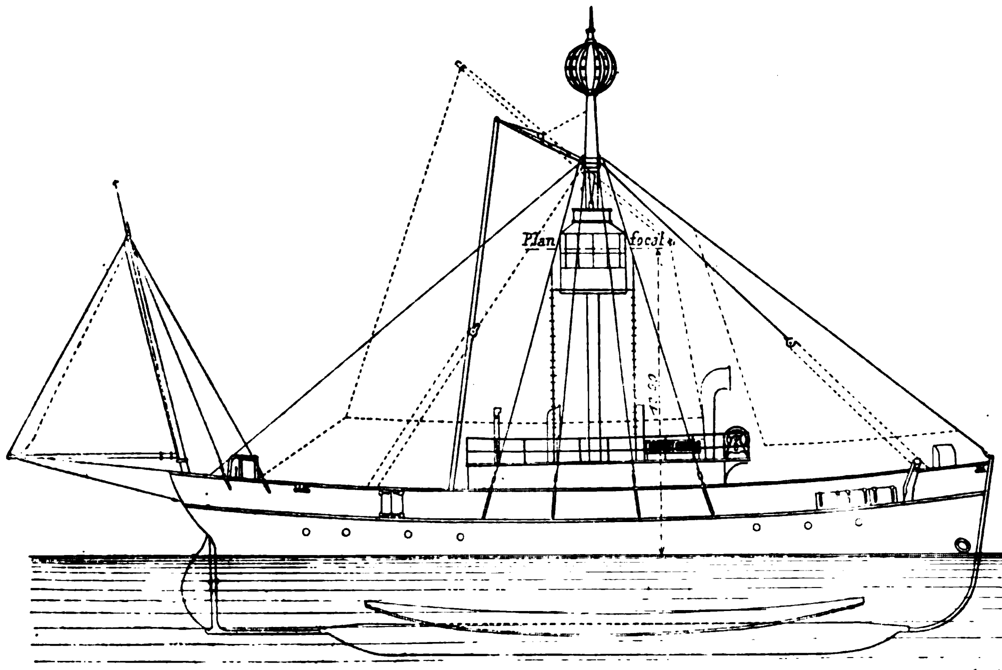


Fig. 353. — *Ruytingen.*

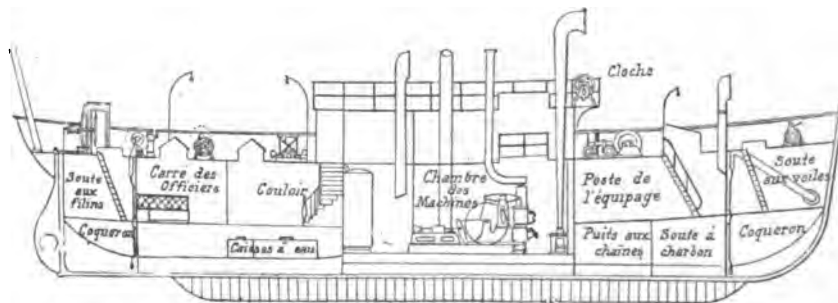
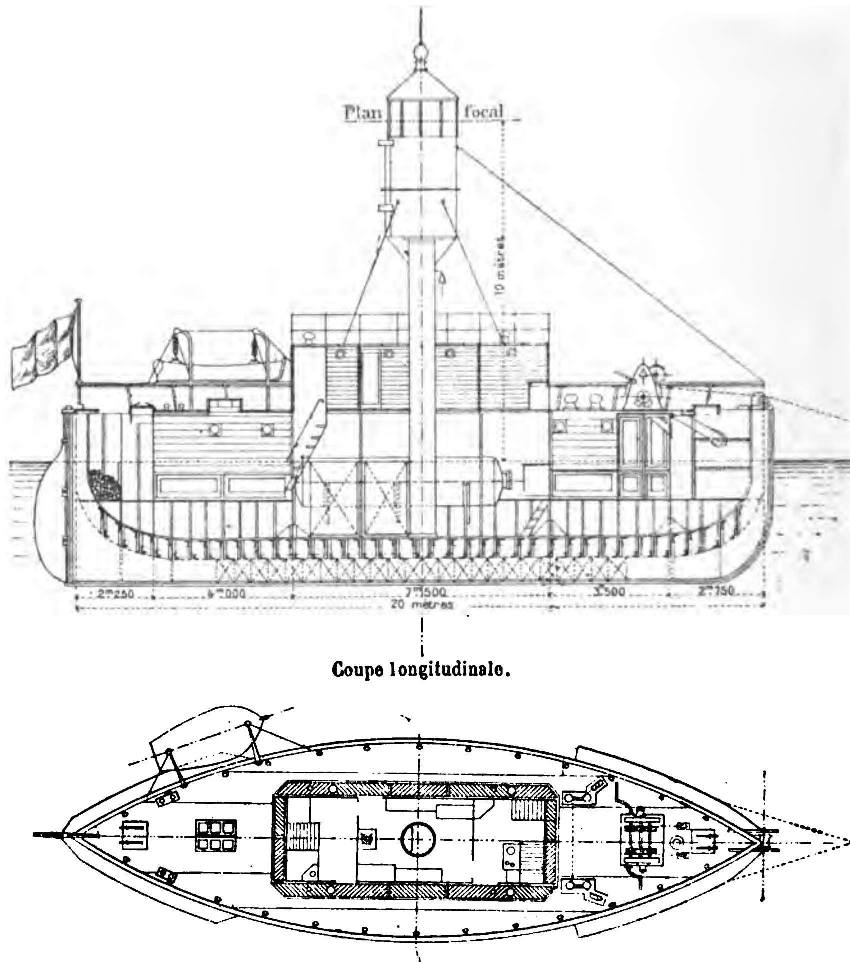


Fig. 353. — Coupe du *Ruytingen.*

Le personnel passe quinze jours à terre après chaque mois de service; il comprend : un capitaine et son second, douze matelots et deux chauffeurs mécaniciens.

L'établissement a coûté 270 000 francs; la dépense annuelle est de 40 000 francs.

Nouveaux bateaux-feux. — Les bateaux feux tels que le *Ruytingen* et le *Nouveau-Dyck* sont coûteux de frais d'établissement et d'entretien. L'éclairage au gaz permettant des aménagements moins considérables, on a pu durant ces dernières années construire en France des bateaux plus petits contenant des réservoirs de gaz et dont les appareils d'éclairage sont installés à poste fixe au sommet d'un mât métallique tubulaire par l'intérieur duquel on y accède.



Coupe longitudinale.

Fig. 354. — *Snouw*. — Plan.

Trois nouveaux bateaux ont été ainsi installés : l'un sans gardien à Rochebonne, a 14,50 *m* de longueur; un autre à Talais (Gironde), de 18,50 *m*, est monté par trois hommes. A la suppression du roulis con-

courent l'abaissement du levier métacentrique, l'augmentation des moments d'inertie par le màt et l'adjonction de quilles latérales très développées.

Snouw. — Les divers perfectionnements ont été réunis sur le bateau construit pour le poste du *Snouw* près de Dunkerque (fig. 354) dont voici les dimensions :

Longueur	20,00 *m*
Largeur hors membres au maître-couple	6,00
Creux	3,99
Tirant d'eau (compris la quille centrale de 75 *cm* de hauteur)	3,57
Déplacement	126 tonnes

La lanterne d'éclairage est du type pendulaire décrit ci-après ; elle a 1,80 *m* de diamètre.

La surface de flottaison est de 71,72 m^2 ; le bras de levier métacentrique de 44 *cm* transversalement et 9,30 *m* longitudinalement.

Le bateau est mouillé sur un corps mort en fonte au moyen d'une chaine en fer de 36 *mm*, terminée supérieurement par une patte d'oie dont les deux branches passent chacune dans un écubier latéral, puis sur une bitte de tournage et sont ensuite manillées ensemble sur le pont ; un guideau à bras permet la visite de la chaine.

La stabilité au roulis est presque absolue ; mais le tangage était accentué ; on y a remédié provisoirement par des soufflages en bois à l'avant et à l'arrière, portant à 14 mètres le bras de levier métacentrique longitudinal.

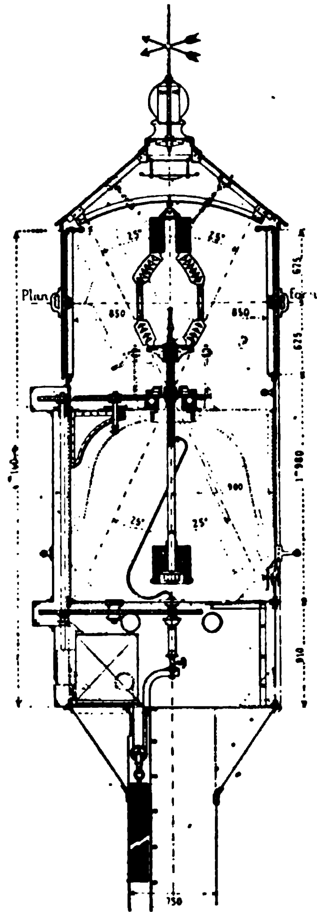


Fig. 355. — Lanterne à optique pendulaire

Les feux flottants n'étaient guère éclairés jusqu'à ces dernières années que par des lampes à réflecteurs. Aujourd'hui, ils sont munis, en France, de feux lenticulaires à éclats de grande puissance, dont la suspension a

nécessité une installation spéciale, pour éviter des inclinaisons supérieures à 10° qui auraient pu occasionner la disparition d'un éclat et par suite l'altération du caractère du feu.

On a utilisé à cet effet les propriétés du pendule composé (fig. 355).

L'optique lenticulaire à quatre panneaux de 25 *cm* de distance focale est prolongée à sa partie inférieure par une tige portant un contrepoids en plomb. Cette tige est fixée par une articulation à la Cardan, placée au-dessous de l'appareil, au centre d'un cercle horizontal mû par la machine de rotation et roulant sur des billes en acier. Au sommet de l'appareil se trouve un second contrepoids en plomb.

Le poids total est de 700 kilogrammes. Le centre de gravité est à 15 *mm* au-dessous du point de suspension. La durée d'une oscillation simple est de 8 secondes. Celle d'une demi-période du roulis étant de 4,2 secondes, la différence entre les deux durées est suffisante pour que les écarts de l'appareil ne puissent nuire à l'éclairage.

Le bateau est illuminé à incandescence, au gaz d'huile comprimé.

BOUÉES

Les bouées sont des corps flottants que l'on mouille sur les écueils pour les signaler, ou qui servent à délimiter un passage ou un chenal. On ne les fait plus aujourd'hui qu'en tôle. Elles sont très différentes de forme ; on préfère généralement en France celles dont la partie immergée est hémisphérique, tandis que la forme conique ou biconique est usitée dans les pays anglais. Elles sont lestées de manière à laisser émerger toujours la même surface.

Pour le balisage des chenaux, en France, les bouées sont toujours de couleur uniforme. Le navire qui entre au port doit laisser à bâbord les bouées noires, à tribord les rouges. Celles qui sont rayées de noir et de rouge peuvent être laissées indifféremment à bâbord ou à tribord; elles indiquent simplement un haut-fond sur lequel il ne faut pas passer.

Les bouées portent quelquefois des miroirs, d'autres fois des cloches que les vagues mettent en mouvement.

Bouée lumineuse. — Les bouées lumineuses Pintsch, usitées dans divers ports de l'Europe, ont donné de bons résultats. Elles renferment du gaz d'éclairage comprimé sous une pression de 8 kilogrammes, et

brûlent avec régularité, grâce à un mécanisme spécial. On en construit contenant en mètres cubes 2 et demi — 5 — 7 et demi — 10, et elles correspondent à des durées de 40, 80, 120 et 160 jours.

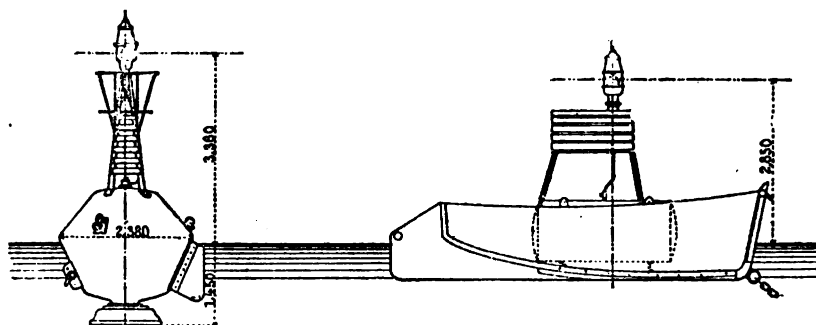


Fig. 356. — Bouées à fond plat et en bateau.

La lanterne est construite de façon que le vent n'a aucune action sur la flamme et que l'eau ne peut y pénétrer.

On s'en sert aussi pour les bateaux-phares.

Les figures 356 et 357 indiquent des bouées lumineuses à fond plat, et la bouée bateau, mais on préfère les bouées à queues dont divers modèles sont représentés par les figures 358.

Pour indiquer les écueils et les bancs qui obstruent l'entrée de la Maddalena, le port militaire sarde, on a élevé onze balises alimentées de gaz Pintsch par une station centrale établie sur l'île de la Maddalena; les feux sont distincts les uns des autres par les éclats, les couleurs et le nombre des foyers établis sur le même support. C'est sans doute l'installation la plus complète de ce genre.

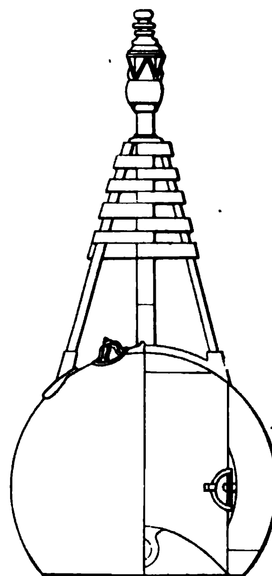


Fig. 357.
Bouée lumineuse à fond plat.

On mouille les bouées en général par de fortes ancres. Sur les terrains rocheux, on emploie des cloches aplaties dites *crapauds*, pesant une tonne environ. Pour empêcher la chaîne de s'user en frottant sur la pierre, mais en lui permettant de suivre la marée, si celle-ci est trop considérable, on en soutient une partie par un flotteur.

Le chenal de Gedney, à New-York, est indiqué par des bouées élec-

triques espacées de 300 mètres; les lampes sont à incandescence, avec filament à triple boucle.

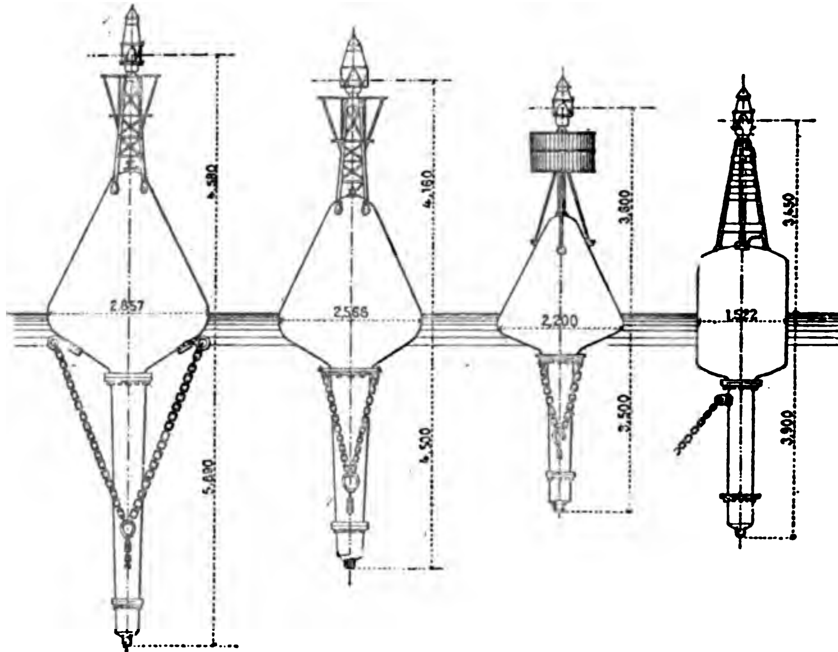


Fig. 358. — Bouées lumineuses à queue.

Eclairage du chenal Gedney, à New-York. — Cet éclairage est obtenu par dix bouées portant les lampes à incandescence. Les bouées sont des mâts en bois, d'une vingtaine de mètres de longueur, ancrés par des crapauds en fonte pesant 2250 kilogrammes ; les mâts émergent obliquement et sont placés de chaque côté du chenal, espacés de 6 à 700 mètres.

La station électrique est située sur la pointe de Sandy Hook ; elle comprend deux machines à courants alternatifs, dont une seule est en fonctionnement, l'autre servant de réserve. Le courant est transporté par des câbles d'une longueur totale de 10 kilomètres.

Les lampes sont de 100 bougies ; elle ont 125 *mm* de diamètre et sont enfermées dans de forts globes de verre ; chacune nécessite quatre ampères.

Bouées lumineuses à acétylène. — On expérimente à New-York des bouées contenant trois réservoirs renfermant chacun 9 kilogrammes

d'acétylène liquide à la pression de 42 kilogrammes par centimètre carré, ce qui permet de produire 274 mètres cubes de gaz. Un régulateur amène le gaz à un brûleur qui consomme un tiers de mètre cube par heure, en donnant un éclairage de 330 bougies, avec une dépense de 5 centimes par heure.

SIGNAUX SONORES

Les signaux sonores sont employés comme auxiliaires des phares, quand le brouillard est trop intense pour permettre de voir le feu. Le plus simple est la cloche. Au nouveau phare d'Eddystone, il en existe deux de 2 000 kilogrammes chacune, placées en deux points opposés de la corniche et frappées mécaniquement de deux coups rapides chaque demi-minute. Mais le son est trop faible pour dominer d'assez loin le bruit de la tempête sur les écueils, et l'on ne s'en sert guère qu'à l'entrée des ports. On emploie rarement aussi un sifflet semblable à celui des bateaux à vapeur ; les appareils courants sont la trompette et la sirène.

La portée des signaux sonores est très variable, suivant les conditions atmosphériques. Par temps très clair, le son ne se fait parfois entendre qu'à petite distance, tandis que la pluie, la neige augmentent la portée ; mais l'air saturé d'humidité constitue quelquefois un obstacle puissant à la propagation.

Trompette. — Le son est produit par la vibration d'une lamelle d'acier mue par le passage de l'air comprimé. Au phare du Four, l'installation comprend deux chaudières de la force totale de quatre chevaux, dont la vapeur entraîne l'air dans la trompette à pavillon, placée dans une petite fenêtre circulaire. Le son est rendu intermittent par l'interposition sur le tuyau de conduite de la vapeur d'un robinet commandé par un mouvement d'horlogerie ; le son ne se produit que toutes les cinq secondes.

A l'extrémité des jetées de Calais et du Havre on a disposé des trompettes à anche vibrante constituée par une lame d'acier de 150 *mm* de largeur, 227 *mm* de longueur et de 9 à 17 *mm* d'épaisseur. Le débit est de 200 litres par seconde sous pression de 1 kilogramme.

L'emploi de ces trompettes est délicat.

Sirène. — C'est aujourd'hui presque le seul instrument usité. Sauf les dimensions elle est identique à celle de Cagniard-Latour. Le gaz

comprimé s'échappe par une série d'ouvertures disposées en cercle, devant lequel tourne un disque plat percé d'ouvertures semblables; mais les orifices sont inclinés en sens inverse, de sorte que l'échappement intermittent du gaz, qui produit le son, détermine aussi la rotation.

En Amérique cependant, la rotation est obtenue par un mécanisme, système rejeté en France à cause de ses inconvénients.

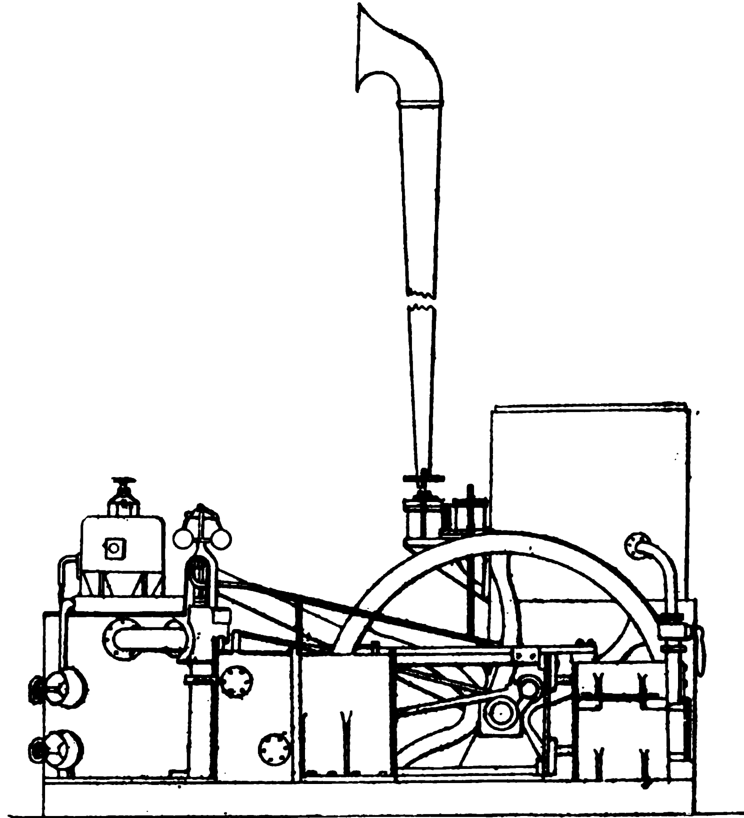


Fig. 359. — Sirène à air chaud.

L'installation d'une sirène est coûteuse et nécessite des soins particuliers pour déterminer la nature du son, son influence sur la portée, etc. Nous donnerons seulement quelques indications telles qu'elles résultent de la pratique en France (fig. 359).

La pression de l'air comprimé est de 2 kilogrammes par centimètre carré. Le disque mobile, de 100 millimètres de diamètre, est percé de 28 trous de 28 millimètres de profondeur et 3 millimètres de diamètre ;

il accomplit 12 révolutions par seconde en consommant 400 litres d'air (mesurés à la pression atmosphérique). On obtient ainsi un son de 326 vibrations. Des expériences ont démontré qu'il n'y a pas intérêt à augmenter le diamètre qui ne doit pas dépasser 15 *cm* et être le tiers des pleins qui séparent les orifices. Un réservoir règle la pression de l'air, dont la constance est nécessaire.

Pour la sirène précitée, si le tuyau a 25 mètres de largeur, le diamètre est au moins de 12 *cm*. La portée varie de 1 à 5 milles. La force nécessaire est de 40 à 50 chevaux.

Au phare de Sainte-Catherine (île de Wight) la sirène a 19 *cm* de diamètre ; la pression est de près de 3 kilogrammes par centimètre carré ; mais en général les données en Angleterre se rapprochent de celles que nous avons indiquées pour la France.



Fig. 360. — Installation des sirènes à Ailsa Craigh.

Au phare d'Ailsa Craigh, à l'entrée de l'estuaire de la Clyde, le signal sonore n'aurait pu être entendu de partout, s'il avait été placé dans l'unique point où l'on a pu installer la tour et les machines. Deux sirènes ont été placées, l'une à 960 mètres, l'autre à 675 mètres de distance, et l'air comprimé y a été envoyé par des tuyaux de 63 millimètres (fig. 360).

D'autre part, dans une expérience pratiquée en France, on a constaté qu'à l'extrémité d'une conduite en grès de 11 kilomètres de longueur et 30 *cm* de diamètre, le son arrivait très faible.

La sirène de Belle-Ile (fig. 361) se trouve également très éloignée du

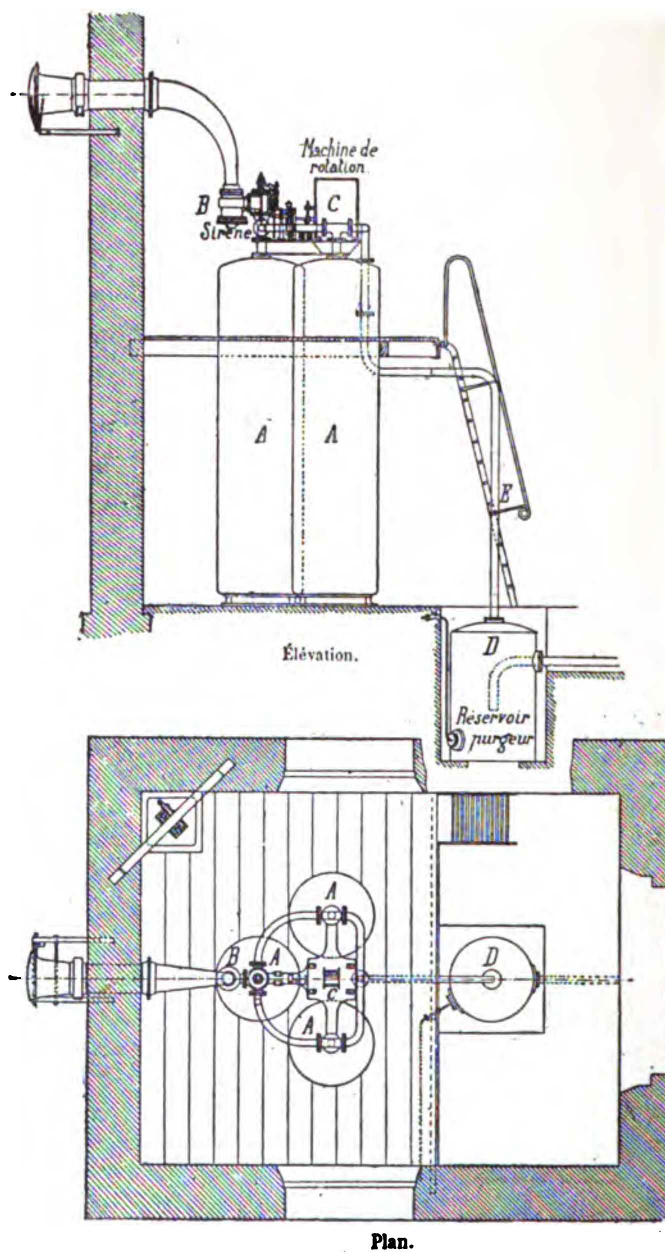


Fig. 361. — Sirène de Belle-Ile.

phare, 1300 mètres. Elle émet toutes les deux minutes un groupe de

deux sons d'égale hauteur ayant chacune une durée d'environ trois secondes.

Les émissions du son sont commandées par l'électricité. Le dispositif comprend :

Une dynamo actionnée par l'arbre de la salle des machines, et dont le courant est commandé par un distributeur rotatif. Transmis par un conducteur souterrain, il agit sur un électro-aimant qui ouvre la soupape d'admission de la sirène.

Un accumulateur fournissant le courant nécessaire pendant les arrêts de la machine.

A, réservoirs distributeurs de 1,50 m^3 de capacité chacun.

B, sirène.

C, machine.

D, réservoir purgeur.

E, tuyau de cuivre raccordant ce dernier réservoir avec les premiers.

Installation. — L'installation générale des signaux sonores dans les phares de grand atterrissement se fait en tenant compte de trois conditions primordiales : Utilisation des ressources du phare en personnel et matériel. Production instantanée du son. Émission du son dans les meilleures conditions.

En France, on n'emploie plus que l'air comprimé et l'on réunit dans un même local la machinerie de l'éclairage et de la production du son qui comprend trois moteurs à air chaud de 9 chevaux chacun, agissant par courroie sur une transmission aérienne qui commande d'une part les appareils électriques, d'autre part un compresseur ; l'air est refoulé dans un réservoir, d'où il va à la sirène.

En cas de brouillard la nuit, quand les moteurs sont en marche, un simple embrayage suffit pour mettre en mouvement le compresseur d'air ; la journée, on a recours momentanément en attendant le fonctionnement des machines, à de l'air comprimé à 15 kilogrammes dans deux réservoirs dits *accumulateurs*, et qu'on réduit à la pression voulue de 2 kilogrammes par un détendeur.

La figure 362 indique les dispositions générales de l'installation du phare de Belle-Isle, qui a coûté 70 000 francs, sans les frais de mise en place.

A, moteurs à air chaud. B, compresseur d'air. S, sirène. D, accumulateurs d'air. E, réservoirs distributeurs. H, détendeurs. I, moteur

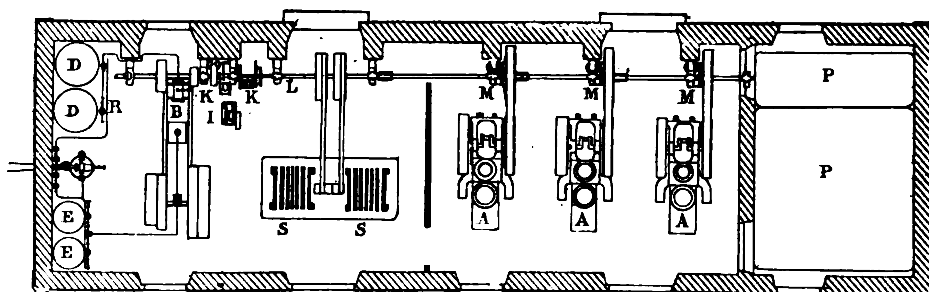


Fig. 362. — Installation de la machinerie du phare de Belle-Ile.

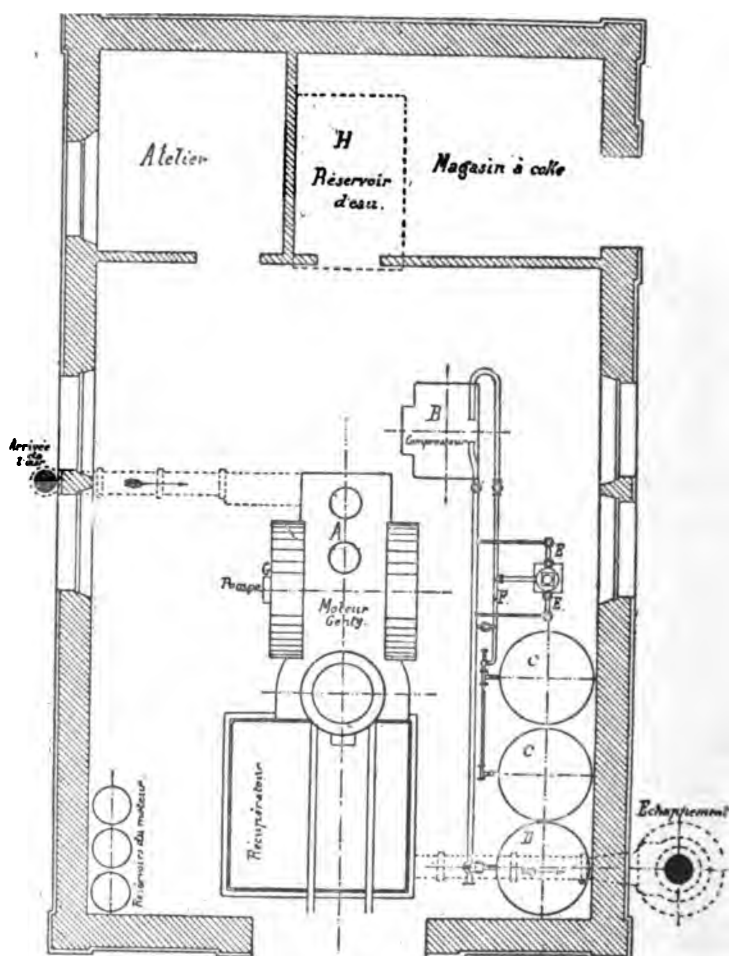


Fig. 363. — Machinerie du signal sonore d'Antifor.

oscillant, de 1/2 cheval, avec régulateur de vitesse, actionné par les accumulateurs, et chargé de la distribution de l'air à la sirène. K, dynamo et distributeur de courant actionnant la sirène et réglant le rythme et l'émission. L, transmission. M, embrayages. P, réservoir. R, tuyauterie.

Les machines électriques du phare sont figurées en S.

La figure 363 représente la machinerie du signal sonore d'Antifer ; le moteur est à air chaud, avec récupérateur de chaleur qui procure une économie de combustible de 30 %.

L'air est comprimé à deux atmosphères dans un compresseur à quatre cylindres étagés, relié directement au moteur qui présente des avantages analogues à ceux des machines Compound.

Coton-poudre. — On se sert aussi en Angleterre avec succès de signaux produits par l'explosion du coton-poudre ; ils s'entendent aussi loin que la note de la plus forte sirène. Au phare de Bell Rock, où primitivement existait une cloche de 250 kilogrammes dont le son s'entendait fort mal, a été installé un appareil à coton-poudre, dont la portée varie de 2 à 20 milles.

L'appareil peut être rendu automatique en faisant porter la charge de coton (120 grammes) par une chaîne sans fin mue par un mécanisme d'horlogerie, à l'extrémité d'une corne de mât où a lieu l'explosion.

Bouée-sifflet Courtenay (fig. 364). — Cet ingénieux instrument est basé sur ce fait que l'ondulation de la vague ne se propage qu'à une faible profondeur. Supposez un long tube de 8 à 9 mètres, ouvert et plongeant dans l'eau tranquille ; celle-ci y montera jusqu'au niveau extérieur.

Si sur la couche supérieure du liquide il se forme des ondulations insensibles à la base du tube, le niveau ne changera évidemment pas, puisque l'eau ne pénètre que par l'extrémité inférieure.

Donc si par un flotteur on permet au tube de suivre les mouvements de la vague, la distance entre la base supérieure du tuyau et le niveau de l'eau variera, égale à l'amplitude de l'onde.

Le tube est fermé à sa partie supérieure. Un peu au-dessus du niveau de flottaison, un diaphragme en tôle forme cloison ; il en part trois petits tuyaux dont deux vont au haut du tuyau déboucher à l'air libre, le troisième aboutit à un sifflet. Les deux premiers sont munis à leur base

de soupapes s'ouvrant de dehors en dedans. Quand le tube s'élève, l'espace compris entre le diaphragme et le niveau immobile de l'eau s'agrandit et l'air y pénètre. Quand le tuyau s'abaisse, les soupapes d'admission se ferment et l'air s'échappe par le tubc muni d'un sifflet.

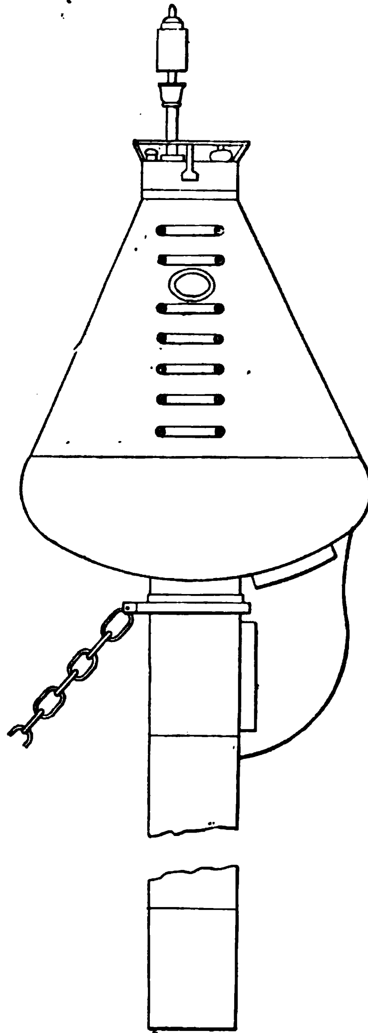


Fig. 364. — Bouée Courtenay.

Ces bouées sont utiles dans les rades ouvertes; leur fonctionnement exige une certaine hauteur des vagues. A Naples, il n'a pu être obtenu à cause de la tranquillité de la baie. Avec une amplitude suffisante, le son s'entend à plusieurs milles.

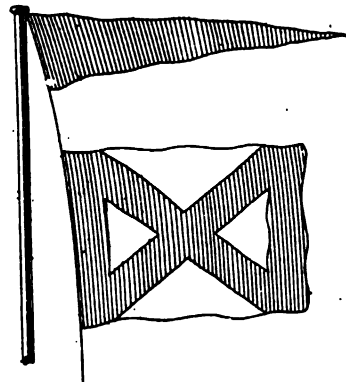
Le flotteur est constitué par une bouée ordinaire.

Sémaphores. — A l'entrée des ports, on établit des mâts de signaux et sémaphores destinés à communiquer avec les navires par des pavillons, des boules et de nuit par des lumières. Voici le tableau de l'indication des hauteurs de marée au-dessus du zéro des cartes en France. Ce tableau, qui peut être modifié selon les besoins de chaque port, indique aux navires le moment où ils peuvent pénétrer (fig. 365).

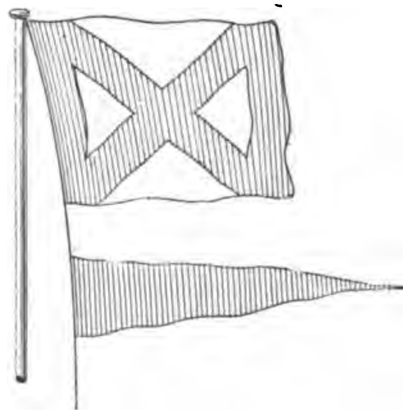
Le tableau est facile à retenir. Il nous semble pourtant que les deux boules qui indiquent 7 mètres auraient dû être en dessous, puisque pour 1 et 4 mètres, on avait commencé ainsi. A partir de 7 mètres, les dispositions seraient donc inverses.

Signaux de nuit. — Pendant la nuit, la hauteur de la marée est indiquée par des éclats, produits par un appareil de feu fixe de 50 *cm* de diamètre éclairant la moitié de l'horizon, d'un réflecteur catadiop-

0.00	0,25	0,50	0,75
1^m,00	1,25	1,50	1,75
2,00	2,25	2.50	2,75
3,00	3,25	3,50	3,75
4,00	4,25	4,50	4,75
5,00	5,25	5,50	5,75
6,00	6.25	6.50	6,75
7,00	7,25	7,50	7.75
8,00	8,25	8,50	8,75
9,00	9.25	9.50	9.75
10,00	10,25	10,50	10,75



Marée montante.



Marée descendante.

Fig. 365. — Signaux.

trique occupant l'autre moitié et d'un demi-tambour de huit lentilles embrassant chacune 22° 1/2.

Ces huit lentilles sont colorées : cinq en rouge et trois en vert; elles peuvent tourner autour d'un axe vertical et se placer dans un plan diamétral de l'appareil, ou au contraire être écartées à volonté, elles colorent donc le feu fixe. La rotation s'effectue en 80 secondes.

Les feux ne sont allumés que lorsque la marée s'est élevée de deux mètres. On n'aperçoit alors que le feu fixe blanc, qui a une intensité de 81 becs et une portée de 13 milles et demi, tandis que l'intensité des éclats colorés est de 250 becs et que la portée est de 12 milles. Par chaque mètre de hauteur de marée excédente on ajoute une lentille rouge; chaque fraction de 25 *cm* est indiquée par un éclat vert. La hauteur maxima signalée est de 7,75 *m*; elle l'est par cinq éclats rouges et trois verts, se succédant à cinq secondes d'intervalle et suivis d'un feu fixe blanc pendant 40 secondes.

Le marche de la marée est indiquée par le dispositif suivant : Deux écrans opaques sont placés vers le milieu de la partie du tambour mobile qui ne porte pas de lentilles colorées, et ces écrans produisent deux occultations rapides à peu près au milieu de la durée du feu fixe blanc. Ils permettent trois combinaisons :

Avec les deux en place, deux occultations indiquant : Mer descendante.
— un — une — — Mer montante.
Les deux enlevées, aucune — ce qui indique : Etale.

Navire spécial (fig. 331). — Le service des phares d'Angleterre (Trinity Corporation) possède un bateau spécial pour la construction de ces édifices, l'*Hercule*. C'est un vapeur à deux hélices, pouvant porter 120 tonnes et capable d'une vitesse de 10 nœuds. Dans sa cale sont disposées deux assises de roulettes sur lesquelles sont posées les pierres et qui les portent au-dessous des panneaux. Là une cage métallique les reçoit; un treuil les élève et les pose sur un truc qu'une voie ferrée conduit à l'arrière. Elles sont alors reprises par le câble qui les transporte à terre, le mouvement étant donné par un autre treuil du bord. En moyenne, en une heure de travail on opère le transbordement de dix pierres.

CHAPITRE XXII

LE NAVIRE

On se contentera de donner quelques notions générales sur les différentes parties qui constituent un bâtiment, notions utiles pour la construction des formes de radoub, des écluses, etc.

Sur la coque d'un navire qui flotte, la surface de l'eau dessine une courbe dite ligne d'eau ou ligne de flottaison; elle varie suivant le degré de chargement. La partie immergée s'appelle *carène* ou *œuvres vives*, la partie au-dessus de la flottaison constitue l'*accastillage* ou *œuvres mortes*.

L'ossature du navire ou *membrure* repose sur une pièce longitudinale inférieure, la *quille*, renforcée de pièces semblables, la *contre-quille* en dessus et la *fausse quille* en dessous. La quille est terminée à l'avant par une pièce courbe relevée, l'*étrave*, et à l'arrière par une autre, l'*étambot*. La pièce de la quille qui rejoint l'étrave s'appelle le *brion*.

Perpendiculairement à la quille s'élèvent des courbes symétriques qui donnent au navire sa forme, ce sont les *couples*, dont la pièce inférieure s'appelle la *varangue*.

Un peu en avant de la moitié du navire se trouve le couple le plus large, le *maître-couple*. Les branches d'un couple sont réunis à la hauteur des ponts par une pièce transversale dite *bau*.

Sur les couples sont disposés des revêtements intérieur et extérieur, destinés à assurer l'étanchéité de la coque; ce sont le *vaigrage* et le *bordé*.

Les planches ou vaigres sont disposées bout à bout longitudinalement; une file de planches s'appelle une *virure* et la plus basse, située au-dessus de la quille, forme la *carlingue*.

La coque des navires en bois est calfatée avec soin et doublée en cuivre jusqu'au-dessus de la ligne de flottaison.

Les navires en fer ou en acier sont construits d'après les mêmes principes, modifiés pour l'usage des pièces métalliques.

est d'ordinaire disposée de façon que le tirant d'eau est plus fort à l'arrière qu'à l'avant; la *différence* atteint souvent plusieurs décimètres. En changeant l'arrimage on peut rétablir l'équilibre et réduire ainsi le tirant d'eau général. Cette précaution suffit pour permettre l'entrée d'un bâtiment dans une écluse ou un bassin de radoub.

Les Anglais dessinent sur la coque de leurs navires une ligne (*water-line*) qui indique le tirant d'eau maximum permis. C'est une excellente précaution contre la tendance à un chargement excessif souvent dangereux.

Tonnage. — On appelle ainsi la capacité d'un navire; elle se compte en *tonneaux* d'arrimage, qu'il ne faut pas confondre avec la tonne, bien que les deux expressions dérivent théoriquement l'une de l'autre. Le tonneau, en effet, est le volume moyen occupé par un poids de 1 000 kilogrammes. En réalité, le tonneau de mer est aujourd'hui estimé à 2,83 m^3.

On estime le tonnage d'un navire par la méthode Moorsom. Le procédé consiste, en substance, à prendre le produit de la longueur du navire par la largeur et le creux au maître-couple. Un coefficient et de nombreuses déductions, surtout pour les vapeurs (chambres des machines, des chaudières, etc., etc.) sont édictés par les conventions du système.

Les dimensions des deux plus grands navires actuellement à flot sont :

	Longueur totale	Largeur	Creux	Tirant d'eau	Déplacement
	m	*m*	*m*	*m*	tonneaux
Oceanic	215,10	20,70	14,90	9,80	24 000
Wilhelm-der-Grosse .	196,00	20,10	13,10	»	20 500

Appareils de levage.— Les vapeurs possèdent des treuils alimentés par les chaudières générales, qui donnent le mouvement aux poulies des mâts de charge. Un certain nombre de voiliers possèdent les mêmes appareils avec des chaudières spéciales; d'ailleurs il est des navires marchant habituellement à la voile, munis d'un appareil de propulsion dont ils ne se servent qu'en cas de calme.

Les bâtiments qui possèdent des appareils de levage les utilisent souvent dans les ports, où l'on n'a dès lors pas intérêt à les placer le long des quais outillés.

Liste des Figures du texte

TABLE DES MATIÈRES

Courbevoie. — Imprimerie E. Bernard et Cie, 14, rue de la Station.
Bureaux : 29, Quai des Grands-Augustins. — Paris.



